



N° attribué par la bibliothèque

pour obtenir le grade de
Docteur de l'Ecole des Mines de Paris
Spécialité "Energétique"

présentée et soutenue publiquement par
Sylvain CROS

le 13 septembre 2004

CREATION D'UNE CLIMATOLOGIE DU RAYONNEMENT SOLAIRE INCIDENT EN ONDES COURTES A L'AIDE D'IMAGES SATELLITALES

Directeur de thèse : Lucien WALD

Jury :

M. D. MAYER	Président
M. H-G. BEYER.....	Rapporteur
M. C. RATTO.....	Rapporteur
M. D. DUMORTIER	Rapporteur
M. H. LE TREUT	Examineur
M. L. WALD	Examineur

Tout ce qui était directement vécu s'est éloigné dans une représentation.

Guy Debord

J'ai inventé une lampe de poche qui fonctionne à l'énergie solaire, elle n'a qu'un dernier défaut, elle ne marche qu'en plein soleil.

Franquin

Aux terriens qui pensent qu'un autre monde est possible.

Remerciements

Voici la dernière page écrite et certainement la première lue. Celle qui ne contient aucune hypothèse, aucune argumentation, aucun résultat et aucune discussion. Elle nous rappelle simplement que la thèse est aussi une aventure humaine mettant en scène des personnages humains. Quel que soit le rôle qu'ils aient joué, je les remercie tous.

Je remercie Didier Mayer pour avoir présidé mon jury de thèse. Je remercie Dominique Dumortier d'avoir accepté le rôle de rapporteur, de même pour Hans-Georg Beyer et Corrado Ratto dont leurs langues maternelles respectives sont différentes de celle exprimée dans cette thèse. Merci aussi à Hervé Le Treut pour l'intérêt qu'il a porté à mes travaux en tant qu'examineur.

Des remerciements particuliers pour celui qui est à l'origine de cette aventure, mon directeur de thèse Lucien Wald. Merci Lucien pour ton enseignement rigoureux de l'art de l'écriture scientifique et de la recherche, pour ta patience et ta grande disponibilité, pour le partage de ta vision des choses qui rappelle toujours que la difficulté n'a de remède que les compétences issues du travail et la foi en ses propres capacités.

Je remercie Michel Albuissou pour son assistance et ses conseils matériels et scientifiques en informatique. Ses aides ont souvent été agrémentées d'anecdotes historiques sur l'informatique, réchauffant agréablement la froideur intrinsèque de cette technologie.

Merci à François Cauneau pour ses éclaircissements exhaustifs de questions scientifiques de fond lors du début de mes travaux. Et aussi pour son humour et son sens critique qui ont animé nos nombreuses discussions.

Merci à Thierry Ranchin pour ses diverses aides et conseils, ses remarques sur mes rapports d'avancement et particulièrement pour son aide sur la fusion de données.

Merci, danke, gracias et takk à tous les membres de l'équipe du projet Heliosat 3, plus particulièrement à Detlev Heinemann pour m'avoir accueilli dans son laboratoire à Oldenburg ainsi qu'à Richard et Rolf pour cette formidable ambiance au cours de mon séjour en verte, humide, plate et chaleureuse Basse-Saxe. A Marion pour notre collaboration. A Antonio pour ces quelques bonnes soirées aux quatre coins de l'Europe et à Knut pour cette ballade près des fjords.

Merci à Fabien et Adile pour leurs travaux.

Merci à tous les autres acteurs du centre d'énergétique, Lionel, Mireille, Axel, Roseline, Anthony pour avoir participé à cette ambiance conviviale.

Merci à tous ceux qui ont participé à cette ambiance dans et hors du laboratoire : Charles-Emile, Juliette, Pierre, Jean-Damien, Séverine, Nils et tous les autres.

J'adresse mes remerciements tout particuliers à Thierry « ze pog » pour ses précieux, pertinents, humoristiques et surréalistes conseils de jeune docteur (un jour nous cartographierons le rayonnement sur Mars et Titan, promis !). A Claire, la nouvelle prêtresse de la fusion de données dont les conseils assortis de sa bonne humeur m'ont souvent sauvé du désarroi. Et Anne-Lise pour diverses choses que je résumerais par le fait que son auto-appellation « le boulet de bureau » n'a, à ce jour, jamais trouvé de justification, bien au contraire.

Un paragraphe spécialement consacré à deux éminents docteurs. Merci et köszönöm à Nicolas et Renaud pour tous ces bons moments dès le début cette aventure, inutile de vous rappelez que vous en êtes les personnages de premier plan, que ce soit au labo ou ailleurs, à Mougins-le-haut ou à Nice, à Valbonne ou à Budapest. Quoiqu'il arrive, je souhaite que notre planète ne soit jamais assez grande pour nous séparer.

De Santa Marta à Grenoble, de Paris à Gagny, de Marseille à Stockholm, vous avez eu beau vous éparpiller sur la planète, durant cette thèse vous avez toujours été rassemblés dans mon esprit comme nous l'étions dans ce petit département sacquenoy-dyonisien. Big up à Mikael, Cédric, Delphine, Virginie (salutations docteur), Yann, Manu, Matthieu « le bijoutier », Philippe « oza », Philippe « philou », Fabrice, Antoine, Sylvain « jehou », Marie, Stéphanie et tous les autres qui ne sont pas cités et que j'ai eu l'immense plaisir de revoir lors de mes visites à Panam ...

Merci beaucoup à Carine pour ses nombreuses visites et plein d'autres choses, à Esther, à Daniel.

Et merci à ma famille pour son soutien et pour sa venue à la soutenance.

Table des matières

CHAPITRE I :

INTRODUCTION.....1

I.1 CONNAITRE LE RAYONNEMENT SOLAIRE AU SOL	3
I.2 UN RESEAU DE MESURES METEOROLOGIQUES INSUFFISANT	4
I.3 AVANTAGES ET LIMITES DES ESTIMATIONS DU RAYONNEMENT A PARTIR D'IMAGES SATELLITALES	5
I.4 AMELIORER L'ACCES A L'INFORMATION DE RAYONNEMENT SOLAIRE : LE PROJET DE L'ECOLE DES MINES DE PARIS	6
I.5 OBJECTIFS DE LA THESE	7
I.6 DEMARCHE - CONTENU DE LA THESE	8

CHAPITRE II :

ACCES A L'INFORMATION CLIMATOLOGIQUE DU RAYONNEMENT SOLAIRE.....11

II.1 ESTIMATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE A PARTIR DE MESURES EN STATION AU SOL	13
II.1.1 Le réseau radiométrique mondial	13
II.1.2 Accès aux données	14
II.1.3 Le cas particulier du BSRN	14
II.2 Estimations à partir d'images satellitales	15
II.3 RE-ANALYSE DE MODELES NUMERIQUES DE PREVISIONS METEOROLOGIQUES	19
II.4 SYSTEMES D'INFORMATIONS INTEGRES	19
II.4.1 Meteonorm	19
II.4.2 Satel-light	20
II.4.3 Atlas Européen du rayonnement solaire (<i>European Solar Radiation Atlas, ESRA</i>)	20
II.4.4 NREL <i>Solar Radiation Resource Information</i>	22
II.5 SYSTEMES D'INFORMATION COOPERATIFS	23
II.5.1 Le système RETScreen	23
II.5.2 Le service web SoDa	23
II.6 CONCLUSION	24

CHAPITRE III :

DEVELOPPEMENT D'UN SYSTEME D'INFORMATION CLIMATOLOGIQUE SOLAIRE A PARTIR D'IMAGES SATELLITALES.....31

III.1 PRESENTATION DE LA METHODE HELIOSAT II	29
III.2 DESCRIPTION DU SYSTEME COOPERATIF SODA	32
III.3 STRUCTURE DU SYSTEME D'INFORMATION HELIOCLIM-1	33
III.4 DONNEES SATELLITALES UTILISEES	35

III.5 CONCEPTION DE LA BASE DE DONNEES	38
III.6 EXPLOITATION DE LA BASE DE DONNEES	43
III.7 ETALONNAGE, PROBLEMES RENCONTRES	44

CHAPITRE IV: VALIDATION D'HELIOCLIM-1.....49

IV.1 COMPARAISONS ENTRE LES DONNEES D'HELIOCLIM-1 ET LES DONNEES IN-SITU	51
IV.2 COLLECTE ET CONTROLE DES DONNEES D'IRRADIATION GLOBALE JOURNALIERES MESUREES AU SOL	52
IV.3 RESULTATS	57
IV.3.1 Résultats globaux	58
IV.3.2 Influence de la latitude	59
IV.3.3 Influence de la longitude	61
IV.3.4 Influence de l'elevation du terrain	63
IV.3.5 Influence de la fiabilité	65
IV.3.6 Influence de la variabilité temporelle	66

CHAPITRE V: INTRODUCTION DE MSG DANS LES ACTIVITES OPERATIONNELLES D'ESTIMATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE.....69

V.1 INTRODUCTION - PRESENTATION DE MSG	71
V.2 LE SYSTEME HELIOCLIM-2	72
V.3 PRESENTATION DE LA METHODE HELIOSAT III	76
V.3.1 SOLIS CIEL CLAIR	76
V.3.2 LE MODULE " CIEL NUAGEUX "	76
V.3.3 MODE OPERATOIRE D'HELIOSAT III	77
V.4 LE SYSTEME D'INFORMATION INTEGRE HELIOCLIM-3	77
V.4.1 La chaîne de traitement opérationnelle	78
V.4.2 Acquisition, traitement et stockage des données de ciel clair	79
V.4.3 Acquisition, traitement et stockage des données de ciel nuageux	80
V.4.4 Gestion de la requête utilisateur	81

CHAPITRE VI : CREATION D'UNE CLIMATOLOGIE DES AEROSOLS PAR METHODE DE FUSION DE DONNEES.....87

VI.1 AMELIORER LA RESOLUTION SPATIALE PAR METHODE DE FUSION DE DONNEES	85
VI.1.1 Position du problème	85
VI.1.2 Présentation du concept ARSIS	85
VI.1.3 Comment estimer $S(0)_{HF}$?	86
VI.2 APPLICATION	87
VI.2.1 Cartes utilisées	87
VI.2.2 Analyse des corrélations	89
VI.2.3 Application du concept ARSIS	90
VI.3 RESULTATS	90
VI.4 COMPARAISONS AVEC DES DONNEES IN-SITU	92
VI.4.1 Le réseau photométrique AERONET	92
VI.4.2 Méthodologie des comparaisons	92
VI.4.2.1 Conversion de l'épaisseur optique à différentes longueurs d'ondes	92
VI.4.2.2 Calcul de l'épaisseur optique de l'ensemble des types d'aérosol	93
VI.4.2.3 Comparaisons	93
VI.4.3 Résultats des comparaisons	93
VI.5 DISCUSSIONS	94

CHAPITRE VII : CONCLUSION.....95

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....105

ANNEXE I : SOLIS ciel clair.....115

ANNEXE II : Méthode de simulation d'images du canal à large bande de Meteosat-7 utilisant les canaux visibles de Meteosat-8.....145

Chapitre I

Introduction

I.1 Connaître le rayonnement solaire au sol

La quasi-totalité des processus physico-chimiques se produisant à la surface de la Terre dépendent d'une même source d'énergie externe : le *rayonnement solaire* (Vigneau 2000). La Terre intercepte à tout instant, par son hémisphère éclairé, une puissance de $1,8 \cdot 10^{17}$ W sous forme de rayonnement solaire dans une bande spectrale comprise entre 0,25 et 5 μm environ (Perrin de Brichambaut et Vauge 1982). Cette quantité équivaut à 15000 fois les besoins énergétiques mondiaux (Fremy 2000).

Au sommet de l'atmosphère, la répartition de cette puissance n'est pas homogène par suite de la rotation de la Terre et de son obliquité variable selon la latitude et les saisons. Avant d'atteindre la surface terrestre, le rayonnement solaire incident subit l'influence de l'atmosphère. Une grande partie de cette puissance est renvoyée vers l'espace ; 35 à 40 % en moyenne sont réfléchis par les gaz et les aérosols atmosphériques, la surface du sol et surtout les nuages. Ce rayonnement subit également une absorption par les gaz, les aérosols et les nuages. La partie transmise jusqu'au sol ne représente finalement qu'à peine la moitié de la puissance du rayonnement solaire extraterrestre (Liou 1980). La répartition spatio-temporelle du rayonnement solaire au sol n'est donc pas seulement régie par des variations de paramètres astronomiques ; elle est aussi largement influencée par l'état météorologique de l'atmosphère et la nature du sol à un instant donné et sur un point géographique donné (Triplet et Roche 1986).

De nombreux documents soulignent l'importance de la connaissance du rayonnement au sol (Bedel *et al.* 1980 ; Anonyme 1980 ; Anonyme 1983 ; *Sun and Climate* 1980 ; Bériot 1983 ; Anonyme 1984 ; Guyot 1999 ; Raschke *et al.* 1991 ; Thompson et Perry 1997 ; WMO n°557 1981). Cette connaissance est une information essentielle pour différentes applications dont Rigollier (2000) a établi la liste suivante:

- environnement, photochimie de l'atmosphère, qualité de l'air en milieu urbain,
- production primaire, processus photo-biologiques,
- prévisions météorologiques, agro-météorologie, agriculture,
- océanographie, climatologie, ressources en eau (évaporation des réservoirs, qualité de l'eau),
- utilisation des énergies renouvelables (énergie solaire, énergie de la biomasse ...), ingénierie des systèmes et installations solaires, architecture et habitat (confort, économies d'énergies ...)
- résistance et vieillissement des matériaux (polymères, peintures) cosmétiques, santé (indice ultraviolet).

Cette diversité d'applications entraîne une diversité d'utilisateurs et d'usages de la connaissance du rayonnement. Cette diversité a été étudiée dans le cadre de plusieurs projets internationaux (Greif *et al.* 2000 ; Wald *et al.* 2002). Il en ressort que les informations solaires requises par les utilisateurs portent en général sur des données détaillées en tout point du globe, et non uniquement au-dessus de sites isolés, et ceci pour différentes échelles spatiales (du kilomètre au millier de kilomètres). Il s'agit souvent de séries temporelles (minute, heure, journée), de quantités statistiques (moyennes mensuelles, annuelles, climatologiques, courbes de fréquences cumulées, ...), de distributions spatiales et spectrales de l'irradiation, ou encore de

la répartition du rayonnement solaire en ses différentes composantes sur plan horizontal ou surface inclinée.

I.2 Un réseau de mesures météorologiques insuffisant

Le réseau météorologique mondial est composé de stations au sol mesurant, entre autres le rayonnement solaire. Cependant les coûts d'investissement et de maintenance sont élevés pour chaque site. Les réseaux nationaux ne comprennent alors souvent qu'un nombre limité de stations de mesures. Entre 1966 et 1993, 1195 stations ont mesuré la durée d'insolation et l'irradiation globale dans le cadre du *World Radiometric Network* de l'organisation mondiale de la météorologie (OMM). Comme le montre la figure I.1 fournie par le *World Radiation Data Center* (WRDC), la répartition spatiale de ces stations est fortement hétérogène à travers le monde. Nous pouvons constater que le réseau radiométrique est très dense en Europe, au Japon, ainsi que sur quelques parties du littoral sud-américain et australien. Malgré certaines zones en Afrique, les autres continents présentent une densité relativement faible. Les surfaces océaniques, quant à elles, sont quasiment dépourvues de points de mesures.

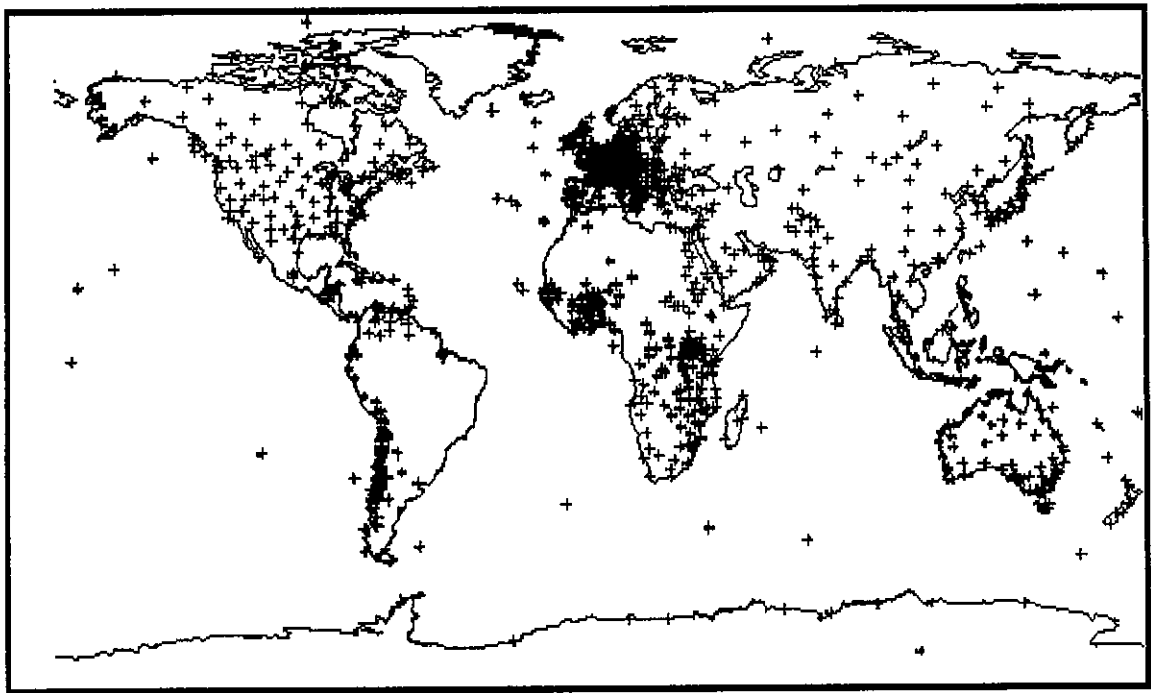


Figure I.1 : *World Radiometric Network* pour la période 1966-1993 (source WRDC)

L'estimation du rayonnement solaire à l'aide de stations au sol nécessite de procéder à des interpolations ou extrapolations de mesures ponctuelles et inégalement réparties sur la surface terrestre. Cette méthode induit des erreurs dues à la distance entre deux stations (Hay 1981, 1984; Hay et Hanson 1985; Zelenka *et al.* 1992; Supit 1994, 1998; Perez *et al.* 1997). Une mesure de la somme journalière de l'irradiation globale est considérée comme valide dans un rayon de 30 km autour de la station (Zelenka *et al.* 1992). Ceci exclut dès lors la possibilité d'obtenir une estimation satisfaisante dans les zones pourvues d'un réseau peu dense. De plus, la forte variabilité de l'éclairement solaire, affecté par de nombreux facteurs, implique que le

réseau de mesures au sol ne pourra jamais rendre compte des détails micro-climatiques du gisement solaire. Ainsi, l'interpolation de mesures situées dans des zones climatiques différentes entraîne une erreur supplémentaire dans l'estimation de l'irradiation (Perez *et al.* 1997).

La qualité des mesures n'est contrôlée en général que pour un nombre restreint de stations. Si la précision sur les mesures des réseaux correctement entretenus est généralement de 3% à 5% (Zelenka *et al.* 1999), une seule donnée erronée suffit pour déprécier sensiblement la qualité de l'estimation. Enfin, les coûts d'investissement et de maintenance d'un site de mesure étant élevés, les données de rayonnement sont parfois coûteuses. L'utilisation des mesures au sol disponibles dans le réseau météorologique mondial ne semble donc pas être une solution appropriée pour répondre pleinement aux besoins des utilisateurs.

I.3 Avantages et limites des estimations du rayonnement à partir d'images satellitales

Une autre possibilité d'estimation du rayonnement solaire consiste à utiliser les images fournies par les satellites météorologiques géostationnaires (Pastre 1981; Noia *et al.* 1993). Différentes méthodes ont été développées pour déduire l'irradiation solaire reçue au sol à partir des observations satellitales dans les domaines spectraux du visible et de l'infrarouge (Bériot 1983 ; Grüter *et al.* 1986). Celles-ci offrent l'avantage d'obtenir une qualité constante sur toute la zone géographique étudiée. Des études ont montré que la précision ne dépend pas de la zone géographique, à l'exception des zones à relief très variable ou pour lesquelles les directions d'illumination ou d'observation sont très obliques (Bériot 1983). La précision dépend en fait fortement de la résolution spatiale des données satellitales : les estimations sont d'autant meilleures que la résolution des images est fine (Zelenka 1994). Les travaux menés par Zelenka *et al.* (1992) ainsi que Perez *et al.* (1997) démontrent qu'il existe une distance moyenne entre les sites, au-delà de laquelle la qualité de l'estimation satellitale surpasse celle issue de l'interpolation et l'extrapolation; cette distance est de 50 kilomètres pour la somme journalière de l'irradiation globale, et tombe même à 34 kilomètres pour l'irradiation horaire. Or, la résolution spatiale des images fournies par le satellite est de l'ordre de 10 km sous nos latitudes. Nous pouvons en conclure que les estimations satellitales sont plus précises que les calculs issus de techniques d'interpolation et d'extrapolation des mesures en station au sol.

Les estimations satellitales sont désormais couramment utilisées par la communauté scientifique et d'autres utilisateurs. Des cartes d'irradiation globale ainsi que des climatologies solaires élaborées dans le cadre de projets internationaux sont produites par ce biais pour des couvertures géographiques mondiales ou continentales (ISCCP, SRB, Satellite, Heidt *et al.* 1998). Plusieurs bureaux météorologiques nationaux utilisent également des images satellitales afin d'en extraire des estimations du rayonnement solaire qui sont utilisées pour les prévisions météorologiques ou distribuées directement aux utilisateurs (SATMOS – Météo-France). Les climatologies solaires, c'est-à-dire de longues séries temporelles, construites à partir d'estimations satellitales sont généralement disponibles, soit pour des échelles nationales avec une haute résolution spatiale de l'ordre de 10 km, soit pour une échelle mondiale mais avec une résolution d'environ 300 km (Cros et Wald 2003).

Cependant, la qualité des estimations satellitales et des informations qui en dérivent ne s'accordent pas toujours efficacement avec les besoins des utilisateurs.

En effet, si l'estimation du rayonnement global sur plan horizontal s'effectue couramment, certaines grandeurs très utilisées, telle que le rayonnement diffus, ne peuvent s'estimer aisément à partir de l'image (Diabaté et Wald, 1995 ; Skartveit *et al.* 1998). Le rayonnement diffus permet d'estimer le rayonnement sur plan incliné, donnée essentielle pour les applications relatives à l'architecture (Erbs *et al.* 1982) ou à l'ingénierie de l'énergie solaire (Kassem *et al.* 1993). Il en est de même pour la distribution spectrale du rayonnement qui permet de calculer par exemple, la fraction du rayonnement photo-synthétiquement actif. Il existe néanmoins des algorithmes permettant de modéliser ces grandeurs à partir de l'irradiation globale (Perez *et al.* 1992 ; ESRA 2000 ; Remund *et al.* 2003) mais leur extraction directe de la donnée satellitale devrait aboutir à une meilleure précision (Diabaté et Wald 1995). Le projet européen Heliosat III inclut parmi ses objectifs une méthode d'estimation de ces grandeurs à partir d'images du satellite *Meteosat Second Generation* (MSG) (Müller *et al.* 2002).

Par ailleurs, ce type d'estimation rencontre des limites concernant la couverture géographique. En effet, l'estimation du rayonnement à partir de satellites météorologiques géostationnaires ne permet pas de traiter les hautes latitudes suite aux limites de leurs champs de vue. Les satellites météorologiques à orbites polaires peuvent être utilisés pour couvrir ces zones (Bériot 1983). Cependant, l'orbite étant à défilement, le satellite parcourt une même zone toutes les 100 minutes environ avec une variation importante de la géométrie d'acquisition. Tandis qu'avec un système géostationnaire, une image d'une même zone est disponible toutes les 30 minutes ou même toutes les 15 minutes avec le satellite MSG, sans variation de géométrie.

Enfin, bien que les premiers satellites météorologiques géostationnaires aient été lancés en 1974, il n'existe pas de séries temporelles de l'irradiation globale à échelle mondiale avec une haute résolution spatiale sur une longue période (Cros et Wald 2003).

I.4 Améliorer l'accès à l'information de rayonnement solaire : le projet de l'école des mines de Paris

Ainsi, la couverture spatio-temporelle des données actuellement disponibles est insuffisante pour les utilisateurs et la connaissance sur le rayonnement solaire doit donc être améliorée. Les bénéfices seraient indéniables si les utilisateurs – ingénieurs, chercheurs, entreprises ou instituts de recherche – pouvaient obtenir l'information pertinente en tout point du globe, à tout instant.

Afin de contribuer à l'amélioration de cette connaissance, le centre d'énergétique de l'école des mines de Paris développe depuis une vingtaine d'années un projet évolutif dont l'objectif est de fournir un système d'information en climatologie solaire adapté aux besoins des utilisateurs. Une première étape fut le développement de la méthode Heliosat (Cano *et al.* 1986 ; Diabaté *et al.* 1988). Elle permet la construction de cartes d'irradiation globale à partir d'images du canal visible des satellites météorologiques. De nombreux chercheurs et ingénieurs de la communauté scientifique internationale l'utilisent étant donnée sa précision satisfaisante et son application opérationnelle relativement simple (Dribssa *et al.* 1999 ; Heinemann *et al.* 2001). Cette méthode a permis au centre d'énergétique de créer avec

plusieurs partenaires européens des atlas solaires (Raschke *et al.* 1991; Satel-Light 1998; Greif *et al.* 2000) couvrant des échelles continentales.

Cependant, les périodes concernées par ces atlas couvrent quelques années seulement. Une des limites d'Heliosat est son incapacité à s'adapter facilement au changement de capteurs. A titre d'exemple, six changements de capteurs se sont succédés pour la série Meteosat entre 1977 et 1998 (Rigollier *et al.* 2002). Cette contrainte empêche le traitement en continu d'une longue série temporelle d'images satellites et impose une grande difficulté opérationnelle pour construire des climatologies solaires sur de longues périodes (Rigollier 2000).

Ce problème, parmi d'autres, a motivé le développement de la méthode Heliosat II. Un des points forts de cette méthode est d'utiliser des images étalonnées en luminance comme données d'entrées. Une méthode d'étalonnage des images du canal visible de Meteosat a été développée. Elle permet de transformer le compte numérique d'un pixel en luminance (Lefèvre *et al.* 2000) à l'aide d'un jeu quotidien de coefficients d'étalonnage calculés à partir de séries temporelles d'images (Rigollier *et al.* 2002). Heliosat II utilise alors des modèles physiques de transfert radiatif connus applicables à ces données étalonnées. Heliosat II possède finalement le grand avantage de pouvoir traiter de longues séries temporelles d'images. La construction de climatologies sur de longues périodes est alors envisageable (Lefèvre *et al.* 2003, Rigollier *et al.* 2003).

L'étape suivante, qui concerne ce travail de thèse, a naturellement été l'application de la méthode Heliosat II à l'ensemble des images Meteosat disponibles de 1985 à 2005. Il a fallu mettre au point un système opérationnel pour créer et exploiter cette climatologie de l'irradiation journalière, appelée HelioClim. Dans le même temps, l'école développait, au sein d'un consortium européen, le service Web SoDa, délivrant de l'information sur le rayonnement solaire. Ce service, qui n'est effectivement qu'un système associant intelligemment des ressources disponibles, fait appel à d'autres serveurs de données ou d'applications, dont le système d'information HelioClim.

Les étapes suivantes, auxquelles nous avons participé, concernent l'exploitation des images du nouveau satellite MSG, mis en service opérationnel en janvier 2004. Cette exploitation a deux volets pour l'instant :

- la continuité du "service" HelioClim, c'est-à-dire, assurer la continuité et la cohérence des séries temporelles d'irradiation pour l'Europe et l'Afrique,
- le développement d'une nouvelle méthode de traitement des images, appelée Heliosat III, et tirant profit des capacités nouvelles d'observation de MSG.

La suite de cette activité de longue haleine sera l'application de Heliosat III pour la création d'une climatologie de meilleure qualité sur le rayonnement solaire.

I.5 Objectifs de la thèse

Cette présente thèse s'inscrit dans ce cadre des travaux Heliosat / HelioClim / SoDa. En bénéficiant des connaissances accumulées et des activités en cours ainsi que d'une coopération internationale, cette thèse a pour objet de contribuer à la création de bases de données climatologiques du rayonnement incident en ondes courtes sur une longue période

pour une grande zone géographique, et des systèmes d'information associés destinés à fournir l'information requise par les usagers.

Quoique notre travail s'inscrive dans une continuité, donc selon certaines contraintes, nous avons bénéficié cependant d'une grande latitude et proposons quelques innovations. Ces dernières ne sont pas toujours faciles à mettre en évidence, à cause de cette continuité d'une part, et d'autre part, de notre séjour de quatre mois à l'université d'Oldenburg (Allemagne) qui est venu interrompre l'activité de conception / réalisation du système HelioClim-1. En effet, ce séjour est intervenu alors que nous venions d'établir les spécifications du système ; c'est par conséquent, une autre personne qui en a effectué la réalisation.

En fait, le développement informatique : concepts, algorithmique, bibliothèques logicielles, outils opérationnels d'exploitation, a été très important dans le projet de l'école. Nous y avons apporté une contribution importante. Si c'est un plaisir de participer à une réalisation majeure, par contre, il n'est pas aisé dans le cadre d'une thèse, de mettre en avant les apports personnels en termes de logiciels et de conception lorsque ces travaux sont aussi intégrés dans un effort d'équipe.

Le premier objectif de nos travaux de thèse est de créer et de valider un système d'information fournissant l'irradiation globale journalière de 1985 à nos jours sur un tiers de la surface terrestre incluant l'Europe, l'Afrique et l'Océan Atlantique en utilisant la méthode connue Heliosat II.

Notre deuxième objectif relève de la mise au point d'une nouvelle méthode d'estimation du rayonnement solaire utilisant MSG. Les nouveaux instruments offrent une description plus fine de l'atmosphère que les anciens et permettent d'aboutir à de meilleurs résultats. Cependant la méthode d'estimation, appelée Heliosat III, est nettement plus complexe et fait appel à d'autres informations issues d'autres satellites. C'est pourquoi elle est développée dans un cadre européen et surtout en étroite collaboration avec le *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt* (DLR, Oberpfaffenhofen, Allemagne) et l'université d'Oldenburg (Allemagne). Nos contributions concernent diverses parties de cette méthode, et plus précisément l'étude d'indices nuageux spectraux ainsi que la création de climatologie sur les aérosols par méthode de fusion de données.

Enfin le troisième objectif consiste à préparer l'introduction de MSG - devenu en janvier 2004 le satellite opérationnel Meteosat-8 - et de la méthode Heliosat III dans les activités opérationnelles d'estimation des paramètres du rayonnement solaire et de leur diffusion. La méthode Heliosat III n'étant pas opérationnelle mais cependant connue dans ses contours, nous nous sommes efforcés de spécifier le futur système d'information fournissant des données solaires d'une qualité améliorée.

I.6 Démarche – contenu de la thèse

Notre démarche a consisté tout d'abord à effectuer un état de l'art des principales possibilités d'accès aux données solaires, toutes techniques confondues. Nous avons listé les diverses sources d'informations, proposé une typologie et classé les sources selon cette nomenclature. Pour chaque type, nous avons analysé ses caractéristiques et évalué ses performances au regard des critères exigés par les utilisateurs (chapitre II). Nous en déduisons les avantages et

inconvenients de chaque type et établissons des spécifications de notre propre système d'information visant à combler les manques les plus criants.

Ce cahier des charges a été utilisé pour concevoir un système d'information, appelé HelioClim-1, délivrant des irradiations journalières pour la zone incluant l'Europe, l'Afrique et l'océan Atlantique (chapitre III). Nous avons utilisé le service web SoDa afin d'assurer efficacement l'interface entre le système d'information et les utilisateurs. Le traitement des images Meteosat au format de résolution réduite (format B2) de 1985 à nos jours par la méthode Heliosat II a permis de créer une base de données complète et de bonne qualité.

Nous avons évalué la qualité des données contenues dans HelioClim-1 en procédant à des comparaisons avec des mesures en stations météorologiques (chapitre IV). Nous avons pour cela collecté des données-sol acquises entre 1985 et 1990 sur plus de 150 stations réparties sur la zone géographique couverte par HelioClim-1. Nous avons calculé les différences entre les données sol et celles d'HelioClim-1. Nous avons ensuite analysé les différences en fonction de plusieurs paramètres géographiques afin d'être en mesure de proposer un modèle des incertitudes des données contenues dans HelioClim-1.

L'expérience acquise durant le développement et la mise en œuvre de ce système HelioClim-1 nous a fortement aidé pour la conception des systèmes HelioClim-2 et -3 faisant suite à HelioClim-1, et devant exploiter le système MSG. Le chapitre V traite de ces deux nouveaux systèmes d'information. Dans les deux cas, nous avons, là aussi, choisi d'utiliser le service web SoDa pour la publication et proposons des spécifications logicielles de liaison entre HelioClim-2 et -3 et SoDa.

Dans la mesure où la méthode Heliosat III s'est révélée plus complexe que prévue et que son développement a pris du retard, il a paru approprié à l'école des mines d'élaborer un système d'information intermédiaire HelioClim-2, pour assurer une continuité dans l'exploitation des données par les usagers et faciliter les transitions et évolutions des systèmes dues aux évolutions des capteurs. Chaque système HelioClim devrait avoir un recouvrement d'environ 2 ans avec son « antécédent » ou son « suivant ». HelioClim-1 devrait ainsi couvrir jusqu'à 2005, HelioClim-2 de 2004 à 2006 et HelioClim-3 à partir de 2005. HelioClim-2 comprend l'application de la méthode Heliosat II à des images simulant ce que devrait voir Meteosat-7 dans les mêmes conditions. Nous avons pour cela élaboré une méthode de simulation du canal visible large bande de Meteosat-7 à l'aide des deux canaux visibles à bande plus étroite de MSG (première partie du chapitre V).

Les concepts de la méthode Heliosat III ne sont pas tous connus, notamment pour la modélisation du ciel entièrement couvert ; ils ne le seront qu'en automne 2004. Nous avons pour notre part effectué un travail sur le potentiel d'indices nuageux spectraux qui peuvent être déduits des deux canaux de l'instrument MSG - SEVIRI (*Spinning Enhanced for Visible and Infrared Imager*) travaillant dans le domaine du visible. Enfin, malgré la méconnaissance des détails de la méthode Heliosat III, nous avons proposé la conception du système HelioClim-3, résultant de l'application de Heliosat III. Cette deuxième partie du chapitre V présente les spécifications, les raisons de nos choix et les interactions entre les différents éléments du traitement, localisés soit au DLR ou à l'école des mines de Paris, à Sophia Antipolis.

L'application opérationnelle de la méthode Heliosat III requiert une estimation des propriétés des aérosols. Celle-ci se fait à l'aide des observations effectuées par le système d'observation

spatiale Envisat. Cependant, l'estimation n'est pas toujours possible et il est nécessaire de recourir à une climatologie des aérosols afin d'avoir toujours une information spatialement complète. Grâce à une méthode de fusion de données, nous avons pu créer une climatologie des aérosols à haute résolution spatiale (0.5°) dérivée de la climatologie *Global Aerosol Dataset* (GADS). Ce travail est rapporté dans le chapitre VI.

Enfin, nous concluons et présentons les perspectives de ce travail de recherche dans le chapitre VII.

Chapitre II

Accès à l'information climatologique du rayonnement solaire

Nous présentons dans ce chapitre un état de l'art des principales sources existantes de données solaires au sol. Cet inventaire suit une typologie que nous avons définie en englobant toutes les techniques de mesure et d'estimation du rayonnement. Les performances de chacun des modes d'accès à l'information climatologique du rayonnement sont analysés suivant les critères établis à partir des besoins exprimés par les utilisateurs et listés dans le chapitre I. Nous en déduisons les manques les plus significatifs de ces besoins et identifions les techniques les plus appropriées pour une amélioration de l'information du rayonnement solaire, tant sur la qualité que l'accessibilité des données. Ces connaissances nous permettront de spécifier les caractéristiques de notre propre système d'information climatologique solaire.

II.1 Estimation du rayonnement solaire à partir de mesures en station au sol

II.1.1 Le réseau radiométrique mondial

Dans le réseau météorologique mondial, des stations au sol mesurent le rayonnement solaire. Les mesures convenablement contrôlées ne sont disponibles que sur un nombre limité de sites et qu'à partir du milieu du XX^{ème} siècle (ESRA 2000). Différents types de données sont mesurés : la durée d'insolation, la nébulosité, l'irradiation globale et plus rarement ses composantes directe et diffuse, sa distribution spectrale etc. Des réseaux de mesure *in-situ* ont ainsi été installés malgré des coûts d'investissement et de maintenance élevés pour chaque site. Dès lors, les réseaux nationaux ne comprennent souvent qu'un nombre limité de stations de mesures, même en Europe occidentale et en Amérique du Nord. Dans d'autres régions du globe, les mesures sont encore plus rares, voire inexistantes au-dessus des océans (cf. figure I.1).

Le nombre exact de stations mesurant l'irradiation dépend de la source d'information. Les stations appartenant à un réseau national ne font pas nécessairement partie de l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM). Selon la liste des stations disponibles en mai 2002, il y a 10928 stations de mesures météorologiques, dont 2900 mesurent la durée d'insolation, et 751 l'irradiation globale. Entre 1966 et 1993, 1195 stations mesuraient la durée d'insolation et/ou l'irradiation globale selon WMO - WRDC. La répartition entre les paramètres de durée d'insolation et d'irradiation n'est pas connue sur leur site web.

Afin de connaître le rayonnement solaire en tout point d'une zone, il est nécessaire de procéder à des interpolations ou des extrapolations des mesures ponctuelles et éparpillées. Plusieurs études ont été menées sur l'estimation du rayonnement par ce biais.

Une valeur journalière mesurée au sol peut être considérée comme valide dans un rayon de 30 km autour de la station (Zelenka *et al.* 1992). La surface validant les mesures d'irradiation journalière effectuées par un site est considérée comme un carré de 0,5 degrés de côté, soit environ 60 km. Si nous nous limitons aux surfaces émergées du globe (soit 30 % de la surface terrestre), en supposant que les 751 stations soient uniformément réparties, la probabilité de trouver un point dans une zone valide de mesure est de 1 %. En d'autres termes, dans 99% des cas, les stations sont trop éloignées les unes des autres pour fournir des informations suffisamment précises aux utilisateurs. En considérant seulement l'Europe centrale et occidentale, hormis la Scandinavie, le nombre de stations est important : 2030 parmi

lesquelles 214 mesurent l'irradiation globale et 890 la durée d'insolation, sachant que la densité spatiale de stations dans cette région est la plus forte du monde. Dans ce cas, la probabilité de se trouver dans une zone valide est de 7 %. A contrario, 93 % des sites géographiques sont trop éloignés de stations.

Ces chiffres doivent être considérés avec prudence. Dans de nombreux pays, il existe des stations non-répertoriées par l'OMM. Les réseaux météorologiques de l'Allemagne et du Royaume-Uni totalisent plus de stations que les 214 cités plus haut pour l'Europe. De plus, des réseaux parallèles pour des applications agricoles ou hydrologiques entre autres, sont inconnus de l'OMM ni même gérés par les bureaux météorologiques nationaux. Néanmoins, nous constatons que même en multipliant le nombre de stations de mesure par 2 ou 3, voire 4, la densité spatiale des réseaux de stations de mesure est trop faible pour pouvoir répondre aux besoins des utilisateurs.

II.1.2 Accès aux données

Obtenir les données n'est pas toujours simple. Elles sont habituellement fournies par les bureaux météorologiques nationaux de chaque pays. L'accès centralisé est parfois possible. Le WRDC fournit un procédé en ligne pour accéder à ses archives.

Les mesures sont effectuées dans la plupart des cas sur une base journalière et non horaire à l'exception d'un nombre restreint de pays. Les utilisateurs doivent trouver des modèles synthétisant l'irradiation horaire à partir de l'irradiation journalière. Ces modèles utilisent des informations statistiques du profil horaire de l'irradiation, lequel n'est pas disponible pour la plupart des stations et doit être calculé à partir d'autres stations réalisant des mesures horaires. Un point positif des mesures en stations consiste à pouvoir disposer souvent de longues séries temporelles. De plus, les données sont sous format numérique. Même les années passées ont été numérisées. La précision de la mesure est très bonne si les instruments sont correctement entretenus.

L'accès aux données est rendu difficile par les différents types de données (horaire ou journalière, irradiation globale ou diffuse, durée d'insolation). Si les données sont collectées dans plusieurs pays, les données sont archivées sous différents formats et sous différentes unités (Jcm^{-2} , Jm^{-2} , Whm^{-2} , calcm^{-2}). Différents modes d'expression du temps sont utilisés (temps universel, temps solaire moyen, temps solaire vrai, heure locale). La mesure standard de l'irradiation horaire définie par l'OMM est la suivante : l'heure considérée pour la donnée est la fin de la période de mesure (exemple : une donnée à 12h00 est équivalente à la mesure effectuée entre 11h00 et 12h00). Ce n'est pas toujours le cas des autres réseaux de mesure où l'heure en question peut être le commencement de la période de mesure ou bien le milieu de la période.

II.1.3 Le cas particulier du BSRN

Le *Baseline Surface Radiation Network* (BSRN) est un projet du programme de recherche mondial sur le climat (WCRP). Il consiste à détecter les variations suffisamment significatives du rayonnement solaire incident pour causer des variations climatiques. Ce réseau est constitué d'un petit nombre de stations (moins de 40) réparties dans des zones climatiques contrastées (figure II.1) couvrant un champ de latitude de 80° N à 90° S. Le rayonnement solaire et atmosphérique est mesuré par des instruments de la meilleure précision existante avec une haute résolution temporelle (de l'ordre de la minute). Les données de rayonnement

sont archivées avec des observations dans les hautes couches de l'atmosphère, le tout dans une base de données intégrée.

La qualité des données issues du BSRN représente une excellente réponse aux attentes des utilisateurs mais seulement sur quelques sites épars à travers le monde. En effet, il manque à ce schéma idéal la disponibilité de ces mesures en tout point du globe. Il est cependant possible d'obtenir des cartes à grande couverture géographique présentant des données d'une qualité spatialement constante sur toute la zone cartographiée. Ces données sont issues d'estimations satellitales.

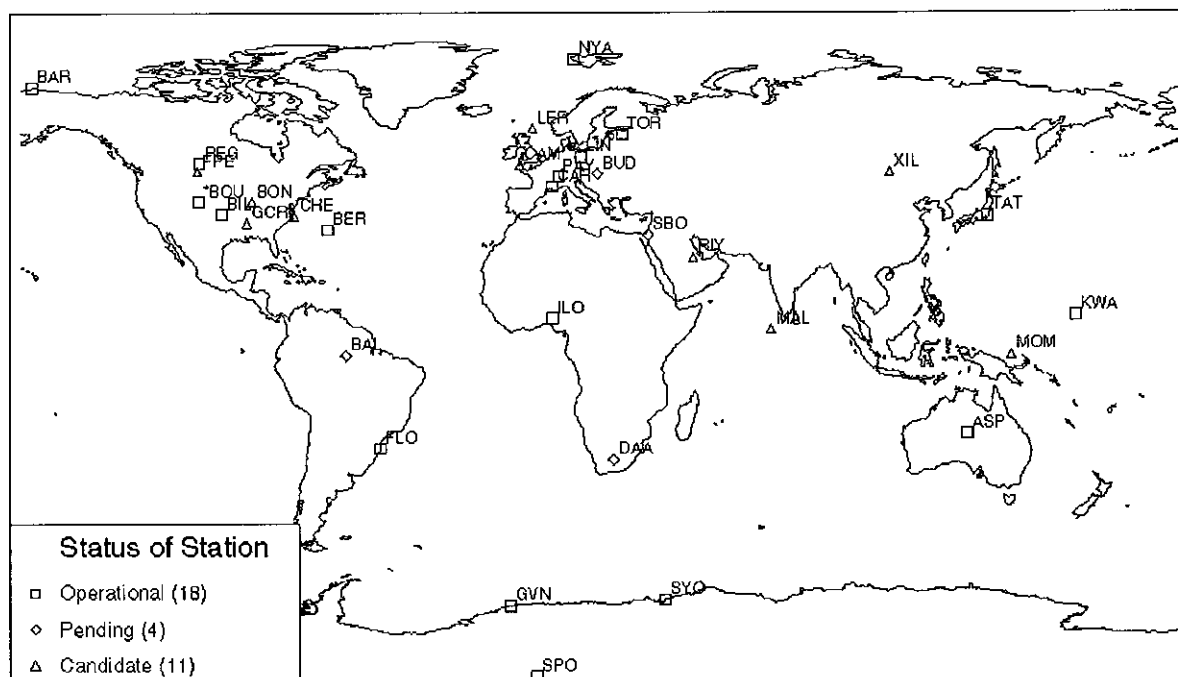


Figure II.1 : Stations du BSRN en avril 2003

II.2 Estimations à partir d'images satellitales

Plusieurs satellites météorologiques observent la Terre de manière régulière, leurs données peuvent être traitées pour estimer l'irradiation globale au niveau du sol. De grandes zones géographiques peuvent être couvertes et l'irradiation est alors connue en tout point de la région observée et par conséquent peut être cartographiée. Ces cartes présentent un échantillonnage régulier dans l'espace, sous forme de pixels. La taille d'un pixel peut varier de 1 à 300 km. Les images sont disponibles toutes les 30 ou 15 min ou moins fréquemment. Les séries temporelles datent, le plus souvent, des années 1980.

La précision relative, en terme d'écart quadratique moyen (EQM) relatif de ce type d'estimation est d'environ 20 % pour l'irradiation journalière. Le biais est souvent petit (de 0 à 3 %). Comparée aux modèles basés sur la couverture nuageuse ou la durée d'insolation, la précision semble être similaire aux régions pourvues d'un réseau radiométrique très dense (Perez *et al.* 1997; Zelenka *et al.* 1992).

Le programme *International Satellite Cloud Climatology Program* (ISCCP) et un des services qui en découlent, le *Surface Radiation Budget* (NASA-SRB 1985), sont probablement les plus connues de ces initiatives de cartographie du rayonnement solaire à l'échelle mondiale. Le SRB fournit gratuitement des cartes de moyennes mensuelles de l'irradiation journalière du monde entier sur des pixels de 280 km de côté (figure II.2). Ces cartes dérivées de mesures satellitales offrent une information sur le rayonnement solaire au sol en tout point du monde. Les données de SRB sont facilement accessibles auprès de la NASA.

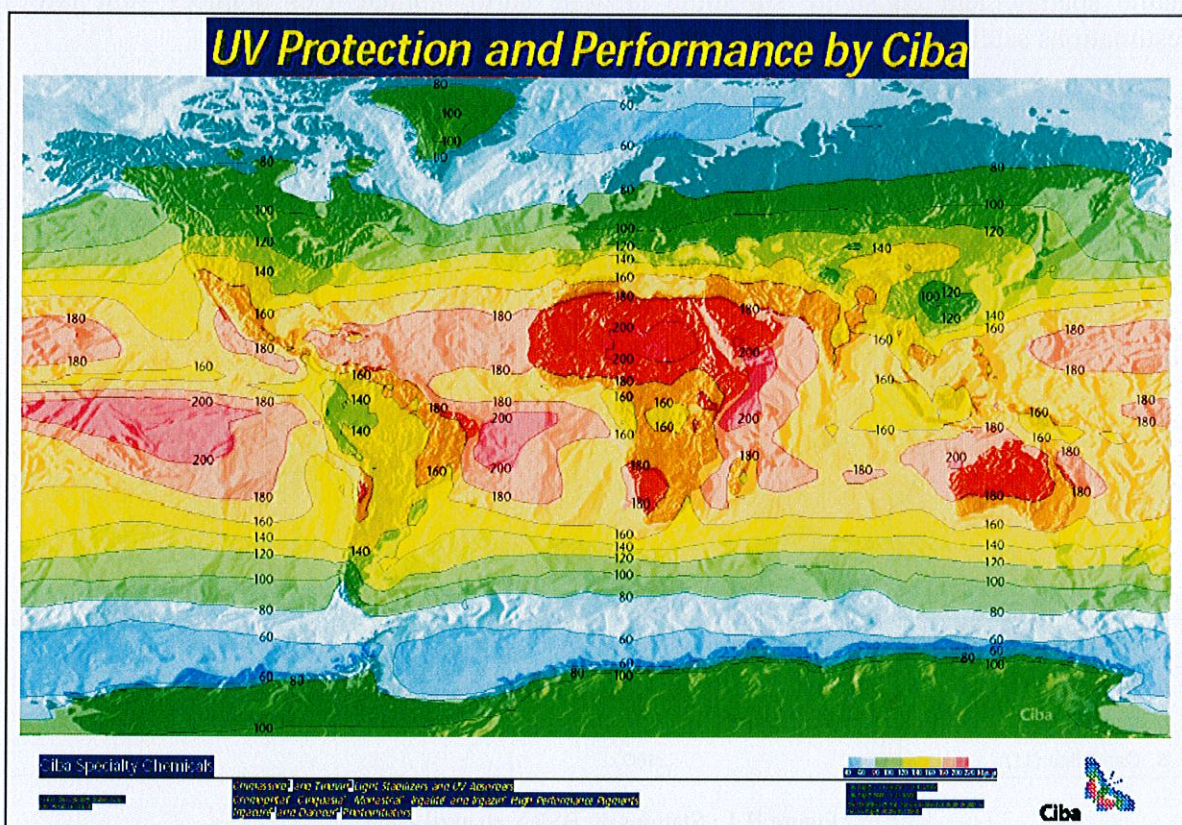


Figure II.2 : Exemple de données fournies par le SRB. Cette carte représente la moyenne annuelle de l'éclairement en kLangley. Copyright CIBA.

Le *NASA Surface Solar Energy Data set* (NASA-SSED) est un dérivé du SRB fournissant des données destinées à l'utilisation de l'énergie solaire. La figure II.3 est un exemple de carte fournie par ce serveur pour le Brésil. La distribution spatiale des données est grossière à cause de la grande taille des pixels.

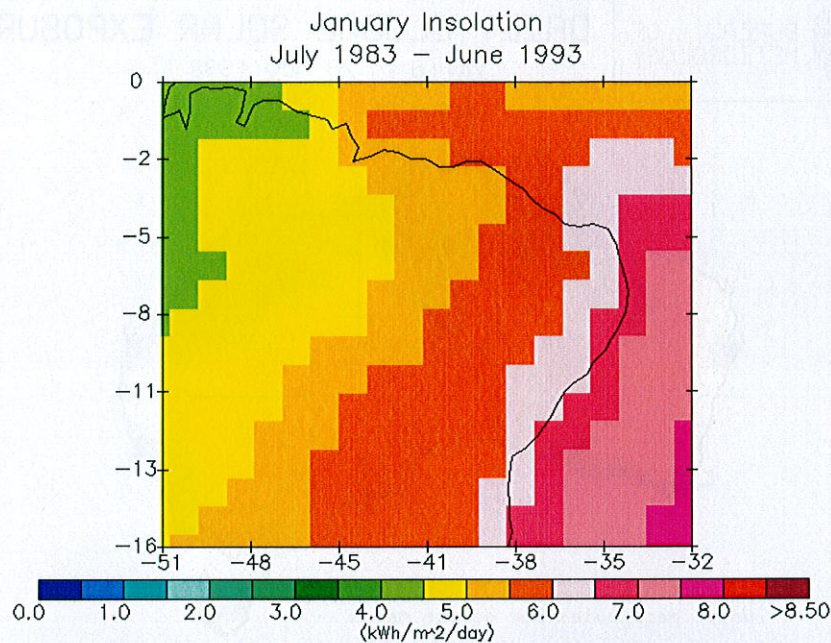


Figure II.3 : Exemple de données du serveur *NASA Surface Solar Energy Data Set*. Il s'agit d'une carte de la moyenne mensuelle décennale pour janvier de l'irradiation journalière pour le Brésil, exprimée en kWh/m². On remarquera que les unités présentées en légende ne sont pas correctes pour des irradiances.

Hormis ces programmes internationaux et celui de la NASA, plusieurs bureaux météorologiques traitent régulièrement des images satellitales afin d'en extraire des cartes d'irradiation horaire ou demi-horaire couvrant de larges zones géographiques. Ces données sont destinées aux prévisions météorologiques et peuvent être distribuées aux utilisateurs. Les bureaux d'Australie, de France, d'Allemagne, de Hongrie ou des Etats-Unis sont connus pour fournir des produits de bonne qualité. Le bureau australien distribue ces informations gratuitement sur Internet (figure II.4). La résolution spatiale des cartes est meilleure que celles obtenues par les programmes internationaux. La distribution spatiale en est beaucoup plus détaillée. Elles permettent de démontrer des relations entre le rayonnement et les caractéristiques géographiques (latitude, orographie ...) d'une zone donnée.

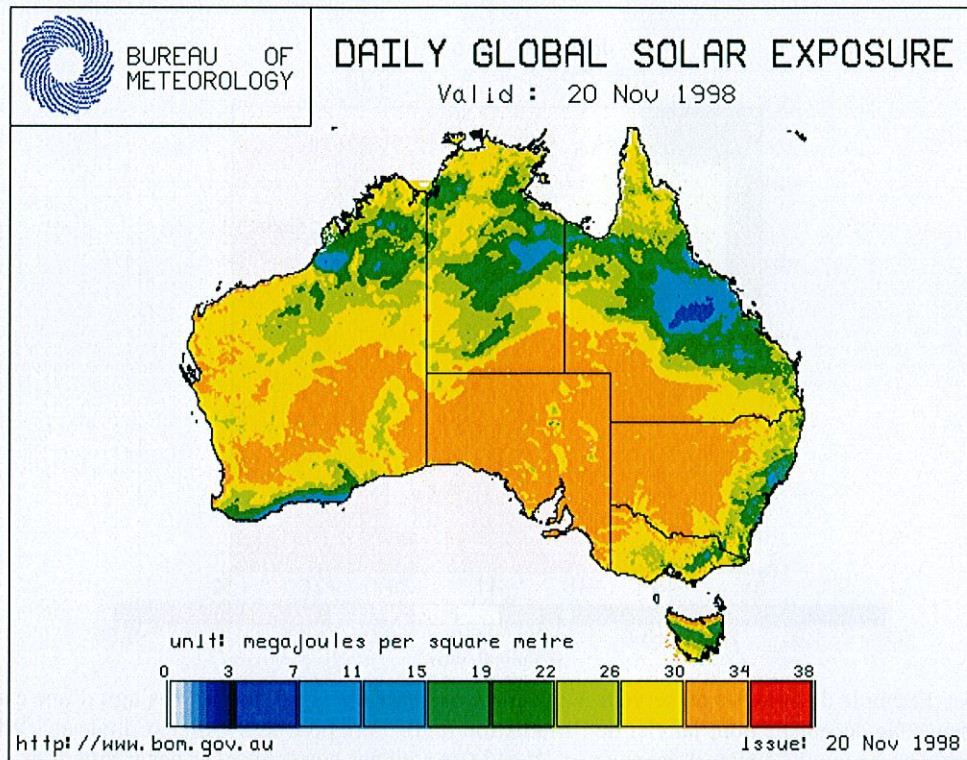


Figure II.4 : Exemple de carte proposée par le serveur du *Australian Global Solar Radiation Archive*. La somme journalière de l'irradiation du 20 novembre 1998 y est représentée en MJ/m².

Indépendamment des bureaux météorologiques, plusieurs projets ont conçu et développé des bases de données accessibles à l'utilisateur pour un coût faible ou nul. Le serveur Satel-Light fournit des informations statistiques (fréquences cumulées par exemple) pour l'Europe. Le serveur de l'université de Siegen (Heidt *et al.* 1998) distribue des données d'irradiation globale sur l'Europe.

L'atout majeur des estimations du rayonnement à partir d'images satellitales est de pouvoir couvrir de grandes zones géographiques avec une qualité constante sur toute la zone étudiée. Cet aspect représente ce que le calcul du rayonnement à partir d'interpolation de mesures au sol ne permet pas d'obtenir. On notera cependant que le champ de vue des satellites géostationnaires n'inclut pas les pôles. Les satellites météorologiques à orbite polaire permettent de traiter ces zones mais avec une résolution temporelle plus basse (image disponible toutes les 100 minutes environ) et une variation importante de la géométrie d'acquisition.

Les méthodes d'estimation satellitale ne permettent pas d'obtenir avec précision une estimation du rayonnement direct et diffus ou de sa distribution spectrale. Cependant, ces grandeurs peuvent se modéliser à partir de l'irradiation globale. Les cartes d'irradiation distribuées par les serveurs cités ci-dessus ne peuvent généralement pas s'intégrer à un logiciel utilisé pour modéliser les composantes directe et diffuse du rayonnement ainsi que des paramètres spécifiques aux utilisateurs : (rayonnement sur plan incliné, partie photosynthétiquement active du rayonnement (PAR) ...). C'est pourquoi les données sont le plus souvent présentées sous la forme de séries temporelles pour un site géographique donné.

II.3 Ré-analyse de modèles numériques de prévisions météorologiques

En marge des estimations à partir du sol ou des images satellitales, il est possible de modéliser l'irradiation globale à l'aide de modèles de prévisions météorologiques. Ces modèles sont utilisés dans un mode de ré-analyse afin de reproduire ce qui a été effectivement observé. Le rayonnement global, appelé rayonnement ondes courtes descendant dans ces types de modèles, est un des paramètres modélisés. Il est couramment exprimé en tant qu'éclairement (flux d'énergie, Wm^{-2}) au lieu d'irradiation (Jm^{-2}). Les modèles peuvent être utilisés pour le monde entier ou avec une résolution spatiale d'environ 1 à 2 degrés d'arc (environ 78 à 220 km sous nos latitudes). Des données d'irradiation journalière sont habituellement distribuées. Il existe aussi des modèles aux échelles régionales et locales, pour lesquels l'accès aux résultats est généralement payant.

Les séries les plus connues produites par ce moyen sont ERA-15 (1979-1993) et ERA-40 (1957-2001) du centre européen pour les prévisions météorologiques à échelle moyenne (*European Center for Medium-Range Weather Forecast*, ECMWF) ou bien celles issues du travail commun entre le centre national de prédiction environnementale (*National Center for Environmental Prediction*, NCEP) et le centre national de recherche atmosphérique (*National Center for Atmospheric Research*, NCAR) qui s'étendent de 1957 à nos jours. Le serveur SoDa permet un accès à l'irradiation globale estimée par les ré-analyses des NCEP et NCAR.

II.4 Systèmes d'informations intégrés

Nous définissons un système d'information intégré comme une base de données complétée par un logiciel d'exploitation (Cros et Wald 2003). Des atlas numériques ont été récemment créés, notamment pour des applications liées à l'énergie solaire. Présentés sur cédéroms ou bien disponibles en ligne sur le web, ils comprennent une base de données (cartes, séries temporelles de mesures au sol ou d'estimations satellitales, années de référence synthétisées, informations géographiques diverses, ...) et un logiciel pour l'exploiter (interface utilisateur, gestion des données, présentations des résultats, importation ou exportation de données, ...). Le logiciel inclut également des modèles pour des calculs avancés de paramètres spécifiques souhaités par les utilisateurs (direct, diffus, spectral, PAR ...). Souvent limités à l'utilisation de l'énergie solaire, ces atlas et serveurs sont d'excellents exemples de ce qui peut être réalisé afin d'apporter à l'utilisateur l'information qu'il souhaite à partir de la simple mesure météorologique. Nous décrivons ici les principaux systèmes d'information intégrés, délivrant, entre autre, des données du rayonnement solaire.

II.4.1 *Meteonorm*

Meteonorm (2000) est un atlas numérique sur cédérom. Il contient une base de données de mesures en stations au sol issue d'une combinaison de plusieurs bases de données de différentes parties du monde (Institut Météorologique Suisse, *Global Energy Budget Archive*, OMM, ...). La principale période de mesure est incluse entre 1961 et 1990. D'autres données climatologiques sont disponibles (température, humidité, vitesse du vent, précipitations) et proviennent du produit CLINO (*Climatological Normals*) de l'OMM.

Le logiciel inclus dans cet atlas permet de calculer des paramètres météorologiques en tout point du globe par un modèle d'interpolation. Il contient également un algorithme pour calculer le rayonnement sur surface inclinée, donnée essentielle pour les applications liées à l'énergie solaire. Les sorties de cet outil sont disponibles sous diverses unités selon le besoin de l'utilisateur.

II.4.2 Satel-Light

Le serveur Satel-Light, issu du projet européen éponyme, présente une base de données estimées à partir d'images de Meteosat accessible par le web et produit en plus d'informations pour les systèmes solaires photovoltaïques et thermiques, des informations utiles pour l'éclairage naturel intérieur des bâtiments (Fontoynt *et al.* 1998; Reise *et al.* 1999). La base de données couvre le continent européen sur une période comprise entre 1996 et 2000 (figure II.5).

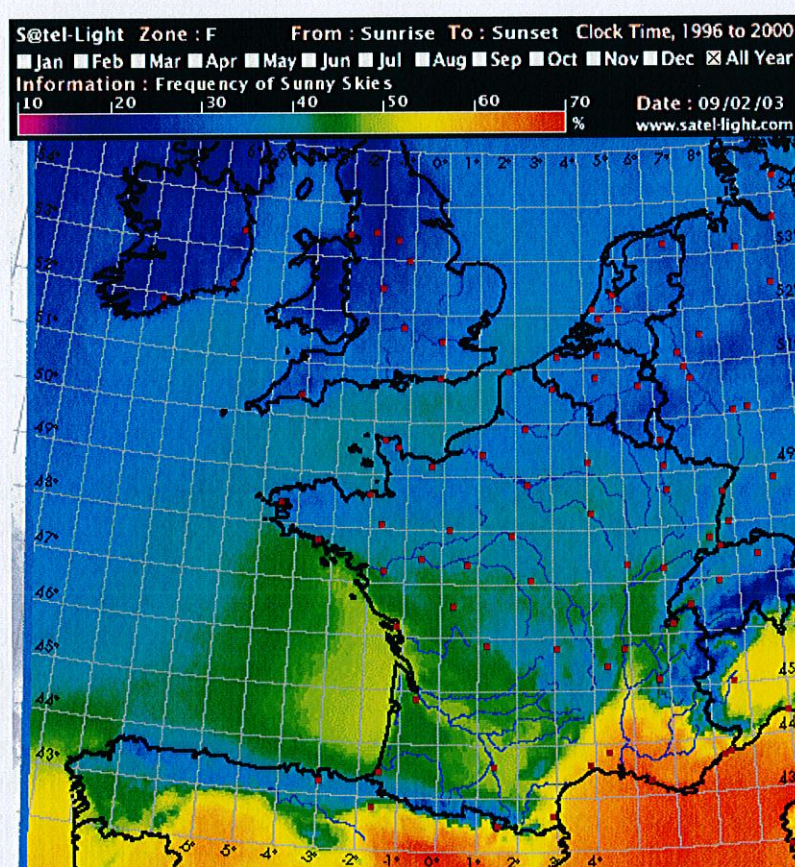


Figure II.5 : Exemple de cartes produites par le serveur Satel-Light.

II.4.3 Atlas européen du rayonnement solaire (European Solar Radiation Atlas, ESRA)

Cet atlas fournit des connaissances et de nombreux éléments de la ressource solaire sur une grande zone de l'Europe, de l'Oural aux Açores et de l'Afrique du Nord au cercle polaire. Les données sont disponibles pour la période de 1981 à 1990. ESRA contient les cartes des moyennes mensuelles de l'irradiation globale, directe et diffuse calculées sur 10 ans (figure II.6). Il propose en outre un véritable cours sur le rayonnement solaire et des éléments de transfert radiatif dans l'atmosphère.

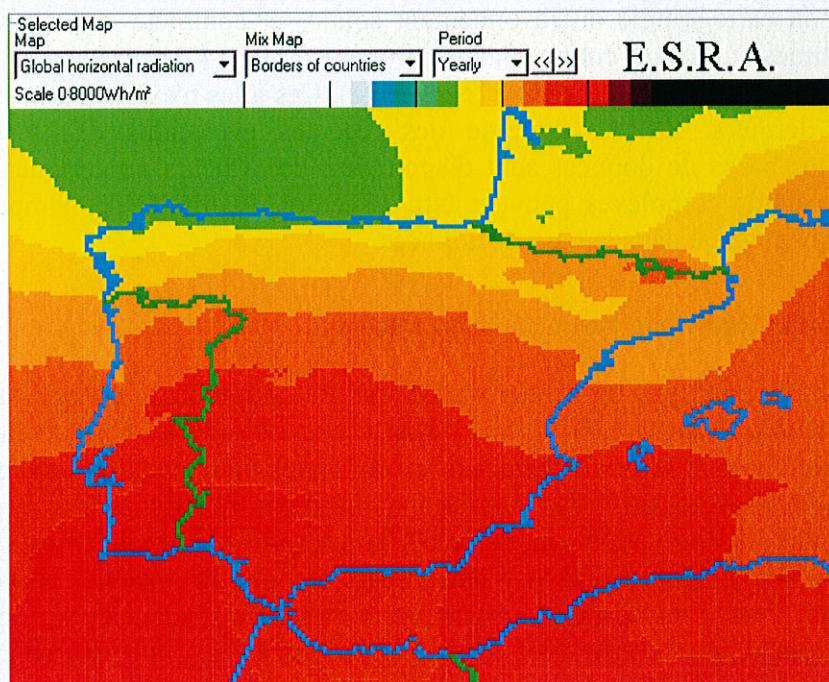


Figure II.6 : Exemple de carte de ESRA. Il s'agit d'une carte de la moyenne annuelle de l'irradiation journalière pour l'Espagne et ses environs exprimée en Wh/m^2 .

Le cédérom contient une base de données qui donne des informations climatiques sur une résolution spatiale de 10 km environ pour différentes échelles temporelles (de la moyenne climatologique - sur plus de 700 stations - à des valeurs horaires ou demi-horaires - 7 stations, sur 10 ans). Il inclut l'irradiation (globale ainsi que ses composantes), la durée d'insolation tout comme la température de l'air, les précipitations, la pression de vapeur d'eau et la pression atmosphérique pour un certain nombre de stations. Ce cédérom contient également un logiciel pour exploiter cette base de données.

Ce logiciel s'utilise en mode "carte" ou "station" selon le choix de l'utilisateur. Dans le premier cas, tout site géographique peut être désigné. Dans le deuxième cas, seules les stations dont les mesures sont disponibles peuvent être sélectionnées. Le logiciel inclut des algorithmes traitant les domaines suivants: géométrie solaire, propriétés optiques de l'atmosphère, estimation de l'irradiation horaire sur plan incliné sous ciel clair, estimation de l'irradiation solaire (conversion de valeurs journalières à des valeurs horaires, d'irradiation sur plan horizontal à plan incliné), l'éclairement spectral, l'illumination, le profil journalier de la température et des quantités statistiques (extrema, probabilités, fréquences cumulées et courbes de faisabilité). Les graphes peuvent être visualisés en deux ou trois dimensions. Quelques algorithmes supplémentaires ont été développés, dont un modèle pour l'évaluation de l'éclairement et de l'irradiation sous ciel clair développé par Page (1995), validé par des auteurs indépendants (Rigollier *et al.* 2000).

Concernant les cartes, les techniques d'interpolation spatiale ne mènent pas à de résultats satisfaisants pour des paramètres météorologiques. L'élévation de terrain a un impact important. Par conséquent, les cartes ont été construites seulement pour le rayonnement solaire, ses composantes et l'indice de clarté. Une nouvelle méthode a été développée à partir des travaux de Zelenka *et al.* (1994) basée sur la fusion entre données-sol et estimations satellitales de rayonnement (Beyer *et al.* 1997).

ESRA continue, sur une plus grande échelle, les précédents travaux de la commission européenne sur la cartographie du rayonnement solaire et complète des travaux similaires d'autres programmes européens comme l'atlas européen du vent (Troen, Petersen 1989), l'atlas africain du rayonnement solaire (Raschke *et al.* 1991). Ces atlas n'existent que sur papier. Par rapport à ces derniers, ESRA bénéficie des récentes évolutions des technologies de l'information. Des bases de données sont disponibles, des valeurs numériques peuvent être exportées, des calculs complexes peuvent être effectués. L'altitude de n'importe quel site géographique est contenue dans la base de données.

II.4.4 NREL Solar Radiation resource information

Un dernier exemple concerne le serveur du laboratoire national des énergies renouvelables (*National Renewable Energy Laboratory*, NREL) aux Etats-Unis. Ce serveur fournit des données d'irradiation sous forme de tableaux ou de cartes couvrant l'ensemble du territoire états-unien. Il donne également des modèles numériques relatifs à l'étude des systèmes énergétiques solaires. L'irradiation journalière disponible sur plan inclinée est cartographiée. On obtient une quantité quasi-exhaustive d'informations pour un système énergétique solaire donné. Cependant, le site mentionne d'utiliser ces cartes avec prudence pour des estimations sur des sites géographiques spécifiques car les variations du rayonnement solaire au niveau local n'y sont pas reflétées.

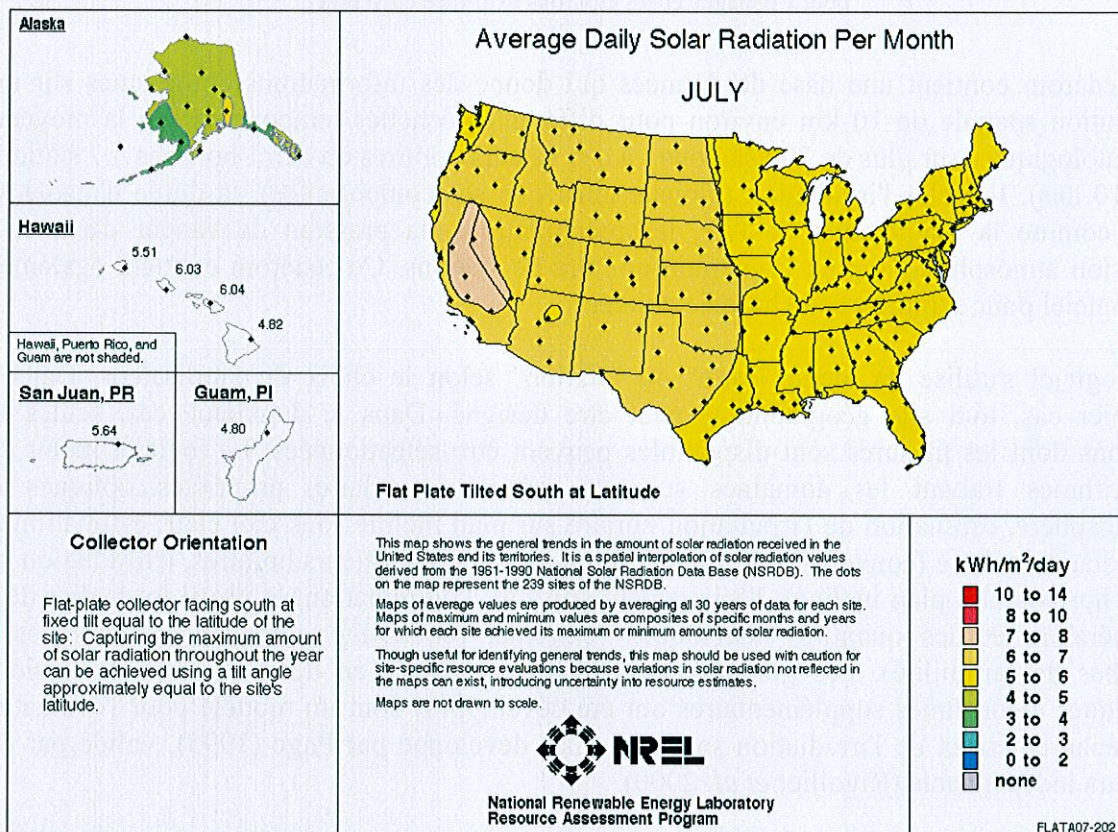


Figure II.7: Exemple de carte fournie par le serveur du laboratoire national des énergies renouvelables. Cette carte présente la moyenne mensuelle de l'irradiation journalière (kWh/m^2) en juillet sur plan incliné vers le sud avec un angle d'inclinaison égal à la latitude du site, on notera que les unités rapportées dans la légende sont physiquement incorrectes pour des irradiances.

II.5 Systèmes d'information coopératifs

Les atlas sur cédérom ont leurs avantages et leurs limites. Des progrès en matière de dissémination des informations du rayonnement solaire sont attendus par rapport aux capacités du web. Cette approche est déjà démontrée par les systèmes d'information coopératifs. Ces systèmes sont essentiellement basés sur les bénéfices d'une interactivité entre plusieurs serveurs web. On appelle système d'information coopératif un système qui délivre des informations en coopérant avec d'autres serveurs fournissant les données météorologiques associées et les algorithmes nécessaires au calcul de l'information requise (Cros et Wald 2003).

II.5.1 Le système RETScreen

Le système RETScreen utilise les données issues du serveur SSE (*Surface meteorology and Solar Energy*) de la NASA. L'utilisateur est invité à copier les sorties de ce serveur et les coller dans le tableau d'entrées du logiciel de RETScreen. Le *RETScreen International Photovoltaic Model* (2000) peut être utilisé pour le monde entier pour évaluer facilement la production d'énergie, les cycles biologiques et la réduction d'émission de gaz à effet de serre pour diverses applications photovoltaïques.

La base de donnée internationale du RETScreen offre aux utilisateurs un accès aux données météorologiques de plus de 1000 stations à travers le monde. Ces données peuvent être utilisées par le module approprié du logiciel de RETScreen. La base de données est disponible gratuitement et elle est directement accessible par chacun des huit logiciels téléchargeables gratuitement de leur site web. Des données satellitales peuvent être utilisées comme alternative, particulièrement dans le cas où le site géographique étudié serait trop éloigné d'une station de mesure. Le serveur SSE fournit aux utilisateurs l'accès aux données météorologiques satellitales de l'ensemble de la planète. Par un lien hypertexte du site web de la NASA, l'utilisateur peut "copier" ces données pour les "coller" dans les formulaires de RETScreen. Ici, la coopération inclut une partie manuelle.

II.5.2 Le service web SoDa

Le service SoDa résulte du projet européen SoDa basé sur des précédentes expériences obtenues lors de la réalisation des produits d'ESRA et des serveurs Satel-Light, Avalanche et SWITCH, et les utilise comme point de départ pour répondre aux besoins des utilisateurs par une utilisation efficace des technologies de l'information et de la communication. Une intégration de sources d'information de différentes natures à l'aide d'un réseau intelligent a été réalisé (Wald *et al.* 2004). Ces sources incluent des bases de données contenant des paramètres du rayonnement solaire et d'autres informations pertinentes. Plusieurs de ces bases de données proviennent de traitement d'image satellitale. Plusieurs d'entre elles étaient disponibles séparément sur le web et le système SoDa organise une coopération par Internet de ces différentes sources d'information. Ces sources incluent également des modèles numériques et des applications. Après validation par des tests d'utilisateurs, le système est opérationnel depuis 2002. Le service SoDa vise plusieurs types d'application: architecture solaire, production de la biomasse, environnement, changements climatiques, océanographie, santé et utilisation industrielle des énergies renouvelables.

Par rapport au service RETScreen, la coopération est ici entièrement automatique et s'effectue au moyen de protocoles standards d'échange de données (HTTP, XML).

Le service SoDa représente une nette amélioration pour l'accès à l'information dans le domaine du rayonnement solaire. Le fait d'avoir un point d'accès commun évite aux utilisateurs de noter différentes adresses web. La standardisation des interfaces demandant les attributs spatio-temporels d'une requête et l'adoption d'un format standard pour décrire ces attributs facilite grandement l'utilisation du service pour les clients. La standardisation des sorties est une amélioration importante. L'accès à l'information est également facilité par les sélections d'algorithmes de qualité prouvée, les plus appropriés pour les besoins des utilisateurs.

L'avantage des systèmes coopératifs, bien illustré par le service SoDa, est qu'ils vont chercher les données et autres ressources les plus appropriées pour répondre au mieux à la requête du client. Le fait que les ressources soient distribuées permet au service de ne pas avoir à collecter lui-même les données, ni de programmer les applications. Il se concentre donc sur la manière dont la requête doit être satisfaite et sur le meilleur choix des ressources. Une évolution prochaine de ce type de système passera par l'utilisation d'intelligence artificielle pour le choix des ressources.

Du point de vue des fournisseurs de ressources, l'avantage existe, ce qui explique le succès d'un service comme SoDa. En effet, le fournisseur reste totalement maître de ses données et applications. Il ne doit pas les installer dans un système centralisé. Cela procure un confort moral : il sait exactement quelles données et applications sont utilisées (élément important selon Wald *et al.* 2004), et permet une grande souplesse : des mises à jour de bases de données ou d'applications, voire des modifications de format interne, n'ont pas besoin d'être répercutées au système centralisé, entraînant un gain de temps et d'effort.

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait l'inventaire des différentes sources d'information existantes. Nous avons remarqué que les séries climatologiques fournissant des données de bonne qualité ne dépassent pas quelques années ou bien sont limitées à un petit nombre de sites géographiques. Les séries dérivées de l'imagerie satellitale sont composées d'informations disponibles en haute résolution spatiale (~10 km) pour des échelles continentales et régionales ; les cartes d'irradiation à échelle mondiale n'existent qu'en basse résolution spatiale (~300 km). Les composantes diffuse et directe ainsi que la distribution spectrale du rayonnement ne sont disponibles que pour un nombre limité de sites si l'on exclut la possibilité de modéliser ces grandeurs à partir de l'irradiation globale. Enfin, l'accès aux données implique en général plusieurs contraintes : coûts importants, format des données non standardisés, unités de mesures variées, fourniture de données non-centralisées et, plus généralement, données disponibles sous des formes non adaptées aux besoins des utilisateurs.

Considérées individuellement, chacune des sources citées possède ses propres atouts. Bien que limitées à des sites ponctuels, les mesures au sol restent une source de données précises si le matériel est correctement entretenu. Certains sites fournissent même les composantes

directe et diffuse ainsi que la distribution spectrale du rayonnement. Il n'existe pas de séries temporelles plus longues que celles offertes par la plupart des stations.

Moins précises que les mesures au sol et limitées à l'irradiation globale, les estimations satellitales permettent de couvrir de grandes zones géographiques ; l'utilisation simultanée de plusieurs satellites rend une couverture géographique mondiale possible. Des cartes régionales sont disponibles avec une haute résolution spatiale.

La ré-analyse est basée sur la modélisation et implique donc de fortes incertitudes sur l'information fournie. Elle permet néanmoins de couvrir le monde entier et se présente sous la forme de longues séries temporelles.

Les systèmes d'informations intégrés et coopératifs gardent pour l'instant les limites des mesures au sol, des estimations satellitales et modélisées. Mais l'intégration de modèles apporte un avantage significatif pour la disponibilité de l'information du rayonnement direct diffus et sa distribution spectrale. La facilité d'accès à l'information reste leur atout majeur comparé aux autres sources d'informations. Enfin, il est vraisemblable que la coopération des ressources diverses et partiellement redondantes (par exemple, données d'origines satellitales, mesures au sol et modélisées) puisse apporter une meilleure qualité que la meilleure de ces ressources.

Nous en concluons que les techniques d'estimations du rayonnement solaire considérées individuellement ne répondent pas à l'ensemble des besoins des utilisateurs. Une combinaison des informations s'avère nécessaire pour offrir la réponse la plus adaptée. Pour cela, les efforts effectués pour le développement de systèmes d'information intégrés et de systèmes coopératifs doivent être encouragés afin de dépasser les limites techniques de la mesure météorologique en utilisant les nouvelles technologies de l'information et de la communication. Malgré une forte incertitude des estimations limitées au rayonnement global, les estimations satellitales représentent une solution efficace pour la cartographie du rayonnement solaire sur de grandes zones géographiques. L'existence de séries temporelles d'images satellitales représente une possibilité de construire de longues climatologies du rayonnement à grande échelle.

Chapitre III

Développement d'un système d'information climatologique solaire à partir d'images satellitaires

L'état de l'art que nous avons établi au chapitre précédent souligne l'efficacité des estimations satellitales et les avantages des systèmes d'informations coopératifs pour combler les lacunes observées dans les réponses aux besoins des utilisateurs. Le centre d'énergétique de l'école des mines de Paris a contribué au développement de tels outils. Ses récentes contributions s'illustrent d'une part par le développement de la méthode Heliosat II. Cette méthode convertit des images de satellites météorologiques géostationnaires en cartes d'irradiation globale avec une grande facilité opérationnelle pour traiter les longues séries temporelles d'images (Rigollier 2000 ; Rigollier *et al.* 2003). D'autre part, le centre d'énergétique a dirigé le développement du système d'information coopératif SoDa, outil de communication mettant en relation via l'Internet plusieurs bases de données relatives au rayonnement solaire. Mes travaux au centre d'énergétique ont débuté lorsque Heliosat II n'avait pas encore fait l'objet d'une application opérationnelle et le système SoDa était à l'état de prototype, en cours de test par les utilisateurs.

En nous appuyant fortement sur ces résultats, nous avons décidé d'apporter une réponse innovante aux besoins des utilisateurs en créant un système d'information, en particulier, en palliant à l'absence de longues séries climatologiques couvrant une grande surface, avec une haute résolution spatiale. Parmi les initiatives proposées pour combler ce manque, les images satellitales et les systèmes d'informations apparaissent actuellement comme les plus appropriées. A partir de ce constat, nous avons créé le système d'information, appelée HelioClim-1, bénéficiant de l'efficacité des estimations satellitales pour estimer le rayonnement solaire au sol et utilisant les systèmes d'information coopératifs pour diffuser les résultats aux utilisateurs. Cette climatologie est facile d'accès, grâce à cette coopération avec le système SoDa. Ces caractéristiques font du système HelioClim-1 une réelle innovation au regard des climatologies solaires actuellement disponibles.

Ce système est réalisé par l'application opérationnelle de la méthode Heliosat II à des images Meteosat et l'intégration des estimations du rayonnement dans une base de données. Le système est déclaré en tant que source d'information du système SoDa. Une série climatologique de l'irradiation globale journalière est ainsi obtenue, couvrant environ un tiers du globe terrestre depuis 1985 à nos jours, actualisée sur une base mensuelle, et accessible par le web.

Ce chapitre rapporte la conception et le développement d'HelioClim-1 en insistant sur mes contributions. Il présente brièvement la méthode Heliosat II et le système SoDa. Il décrit ensuite la conception de la structure fonctionnelle d'HelioClim-1, principale innovation, ainsi que la spécification de la base de données. Il rapporte également les difficultés rencontrées lors de l'application opérationnelle d'Heliosat II à propos de l'étalonnage de la série d'images.

III.1 Présentation de la méthode Heliosat II

Parmi les différentes méthodes développées pour estimer l'irradiation globale à partir d'images satellitales, la méthode Heliosat II (Rigollier 2000 ; Rigollier *et al.* 2003) est l'une des plus appropriées. Elle répond aux objectifs de précision généralement souhaités par les utilisateurs (Lefèvre *et al.* 2003). Cette méthode est une version améliorée de la méthode Heliosat (Cano *et al.* 1986, Diabaté *et al.* 1988, Beyer *et al.* 1996) couramment utilisée et considérée comme l'une des plus performantes (Grüter *et al.* 1986, Dribssa *et al.* 1999). Elle a été développée au

centre d'énergétique de l'école des mines de Paris en collaboration avec plusieurs partenaires européens.

Cette méthode ne traite que des données satellitales préalablement étalonnées. A l'aide d'une méthode d'étalonnage des images, les comptes numériques peuvent être convertis en luminance, grandeur physique reconnue et utilisable par les modèles de transfert radiatif de l'atmosphère (Rigollier *et al.* 2002). Ceci permet à Heliosat II de pouvoir utiliser certains de ces modèles et de s'affranchir ainsi de l'ajustement de paramètres empiriques au cours du traitement d'une série temporelle d'images (Rigollier *et al.* 2004). Heliosat II a donc la capacité de traiter de longues séries temporelles d'images indépendamment des changements de capteurs opérés régulièrement lors des programmes de mise en service des satellites météorologiques.

Le principe de la méthode Heliosat II se base sur le fait qu'une différence de l'irradiation globale perçue par le capteur du satellite est seulement due à un changement de l'albédo apparent, lequel est causé par une modification par l'atmosphère du rayonnement émis vers le capteur. Ce principe est généralement adopté par les différentes méthodes utilisant les images du spectre visible des satellites météorologiques (Pastre 1981 ; Möser et Raschke 1983, 1984 ; Cano *et al.* 1986 ; Stuhlmann *et al.* 1990 ; Delorme *et al.* 1992 ; Colle *et al.* 1999). Le paramètre clé de cet algorithme est l'indice d'ennuagement n , résultant d'une comparaison entre ce qui est observé par le capteur à ce qui devrait être observé au-dessus de ce pixel si le ciel est clair (sans nuages), ce qui représente en quelque sorte la transparence de l'atmosphère (Pastre 1981). Ce paramètre peut s'exprimer de la façon suivante (Cano *et al.* 1986):

$$n^t(i,j) = [\rho^t(i,j) - \rho_g^t(i,j)] / [\rho_{cloud}^t(i,j) - \rho_g^t(i,j)] \quad (3.1)$$

où:

- $\rho^t(i,j)$ est la réflectance ou l'albédo apparent observé par le capteur au temps t , pour le pixel de coordonnées (i,j) , $\rho^t(i,j) = (\pi L_t(i,j)) / (I_{0met} e(t) \cos \theta_s(t,i,j))$ (3.2),
- $L_t(i,j)$ est la luminance observée,
- I_{0met} est l'éclairement solaire au sommet de l'atmosphère dans la bande visible de Meteosat,
- $e(t)$ est la correction de la distance Terre-Soleil,
- $\theta_s(t,i,j)$ est l'angle zénithal solaire,
- $\rho_{cloud}^t(i,j)$ est l'albédo apparent des nuages les plus brillants,
- $\rho_g^t(i,j)$ est l'albédo apparent du sol par ciel clair.

Si le ciel est clair, l'albédo apparent $\rho^t(i,j)$ est proche de l'albédo apparent du sol et l'indice d'ennuagement n est proche de 0. Si le ciel est totalement couvert, n est proche de 1. En résumé, l'indice d'ennuagement n peut être considéré comme une mesure de l'atténuation du rayonnement par l'atmosphère. De ce fait, le paramètre n représente une valeur très pratique pour exploiter les images satellites (Möser et Raschke 1983, 1984 ; Pastre 1981 ; Diabaté *et al.* 1989 ; Wald *et al.* 1992).

Le principe de base n'est pas toujours vérifié. D'autres paramètres peuvent intervenir comme des couches multiples de nuages ou un changement brusque de l'albédo du sol du à des chutes de neige ou à l'ombre d'un nuage voisin. Les variations de la réponse du capteur ne sont pas nécessairement liées à une variation de l'état optique de l'atmosphère ou bien un changement de cet état optique ne se traduit pas forcément par une variation de l'indice d'ennuagement (Cano *et al.* 1986).

L'indice d'ennuagement ne doit pas être confondu avec la nébulosité. Lors d'une situation de ciel totalement couvert, un observateur situé au sol relèverait une nébulosité de 8 octas. Cette nébulosité serait la même quelque soit le nombre de couches nuageuses situées au-dessus d'un même point, tandis que l'indice d'ennuagement tient compte de l'atténuation totale du rayonnement (Pastre 1981).

Les albédos utilisés dans l'équation ci-dessus peuvent être calculés à partir d'une série temporelle d'images satellitales (Cano *et al.* 1986).

L'état optique de l'atmosphère du ciel clair (sans nuage) est donné par un modèle sous la forme de l'irradiation globale et de ses composantes directe et diffuse. Rigollier (2000) a choisi d'utiliser le modèle ESRA (*European Solar Radiation Atlas*, ESRA 2000), également décrit dans Rigollier *et al.* (2000b) et corrigé des effets d'altitude par Geiger *et al.* (2003). L'une des entrées du modèle est le trouble de Linke, facteur permettant d'estimer l'atténuation du rayonnement dû à la présence des aérosols et de la vapeur d'eau (Linke 1922 ; Louche *et al.* 1986 ; Grenier *et al.* 1994). Une autre entrée est l'altitude du sol.

L'indice d'ennuagement n est relatif à l'irradiation globale sur une base horaire (ou demi-horaire) par le biais de l'indice de clarté K_{Th} (quotient de l'irradiation observée par l'irradiation au sommet de l'atmosphère pour le même jour) ou l'indice de ciel clair K_{ch} (quotient de l'irradiation observée par l'irradiation qui devrait être observée si le ciel est clair pour le même jour). La relation entre l'indice d'ennuagement n' (n calculé à un temps t) et K_{ch} est exprimée de la façon suivante (Rigollier et Wald 1998):

$$\begin{array}{ll} n' < -0,2 & K_{ch}' = 1,2 \\ -0,2 < n' < 0,8 & K_{ch}' = 1 - n' \\ 0,8 < n' < 1,1 & K_{ch}' = 2,0667 - 3,6667 n' + 1,6667(n')^2 \\ n' > 1,1 & K_{ch}' = 0,05 \end{array} \quad (3.3)$$

Nous pouvons noter que n prend une valeur négative lorsque le capteur perçoit l'ombre d'un nuage, rendant l'albédo apparent plus sombre que le sol. n est supérieur à 1 lorsque l'albédo du sol est plus clair que l'albédo des nuages, cas typique d'un sol enneigé.

L'irradiation globale horaire G_h pour un pixel de coordonnées (i,j) se déduit par :

$$G_h(i,j) = K_{ch}(i,j) G_{ch}(i,j) \quad (3.4)$$

G_{ch} étant l'irradiation globale horaire déterminée par le modèle ciel clair au-dessus du pixel (i,j) . De manière similaire à ce qui est proposé par Raschke *et al.* (1991), à l'aide de l'indice de clarté K_{Th} , on calcule l'irradiation journalière $G_d(i,j)$:

$$G_d(i,j) = K_{cd}(i,j) G_{cd}(i,j) = G_{cd}(i,j) \sum_{h=1}^N w_h K_{ch}(i,j) \quad (3.5)$$

$$\text{où } w_h = \frac{G_{ch}(i, j)}{\sum_{h=1}^N G_{ch}(i, j)} \quad (3.6)$$

$$\text{On en déduit : } G_d(i, j) = G_{cd}(i, j) \frac{\sum_{h=1}^N G_h(i, j)}{\sum_{h=1}^N G_{ch}(i, j)} \quad (3.7)$$

Les entrées nécessaires à l'exécution de Heliosat II sont donc une série temporelle d'images Meteosat, une carte de l'orographie et des estimations du trouble de Linke pour la même zone.

III.2 Description du système coopératif SoDa

Le service Web SoDa utilise plusieurs serveurs Web dispersés pour répondre au mieux aux requêtes des utilisateurs. Il effectue l'intégration et l'exploitation de diverses sources d'informations, relatives au rayonnement solaire, géographiquement dispersées. Il propose un point d'accès commun à ces sources sous la forme d'un service Internet. Le système inclut également des algorithmes et modèles numériques afin d'élargir l'utilisation des bases de données à d'autres applications que celles prévues par ces dernières. Le système présente une grande flexibilité et peut intégrer d'autres bases de données ou algorithmes relatifs à diverses applications (Rigollier *et al.* 2000a).

Le service se base sur des protocoles disponibles et fiables d'échange de données et sur des systèmes pour guider, connecter et transférer des données à travers des réseaux informatiques. Les applications sont connectées par le web aux lieux des divers fournisseurs de bases de données. La technologie HGS (*HTTP-based Geo-Temporal Searching*) est utilisée (Kleih *et al.* 1998) ; elle définit un mécanisme par lequel des bases de données peuvent être consultées à distance à l'aide d'une interface HTTP standard (un navigateur web par exemple).

Un schéma simple en langage XML a été défini pour l'échange d'informations entre SoDa-IS (le noyau du service) et les applications diverses appelées par la requête utilisateur (Wald *et al.* 2002). Toutes les applications sont décrites en XML par le serveur SoDa. L'adoption de ce langage est un avantage pour les fournisseurs de données. Ces derniers n'ont pas à changer leur propre format de bases de données pour s'adapter au service SoDa.

Des interfaces utilisateurs standards ont été définies pour la description des attributs d'espace et de temps de la requête utilisateur ; requête automatiquement appelée lors du lancement d'une application. De cette façon, la déclaration d'une application est facilitée. Du point de vue de l'utilisateur, cela permet de présenter les différentes applications d'une manière homogène.

Les sorties de ce service sont exprimées en XML. Un convertisseur permet de les transcrire en HTML à la volonté de l'utilisateur ou d'autres formats, comme par exemple un ensemble de valeurs séparées par des virgules, propre à être utilisé dans un tableur.

Pour notre problème, l'intérêt de ce service est qu'il nous offre une interface avec l'utilisateur, en ce qui concerne le choix du site géographique et de la période de temps. Nous n'avons donc pas à nous préoccuper de cet aspect important. La relation entre le serveur SoDa et notre système HelioClim-1 se fera par échange d'informations sur la localisation dans l'espace (latitude, longitude) et dans le temps dans le sens SoDa → HelioClim-1, et les informations d'irradiation ou d'éclairement dans l'autre sens.

III.3 Structure du système d'information HelioClim-1

Le système HelioClim-1 est un système d'information intégré. Nous avons défini sa structure logique de manière à répondre efficacement aux besoins des utilisateurs en tenant compte des moyens dont nous disposons ainsi que des atlas numériques existants décrits au cours du chapitre précédent. Il comprend trois volets :

- le volet de traitement des images, convertissant les images Meteosat en irradiation ou éclairement, à l'aide de la méthode Heliosat II,
- le volet "base de données", sa gestion et son exploitation,
- le volet "serveur Web" qui permet d'accéder à la base de données par le protocole HTTP, et également d'échanger avec le service SoDa.

Nous avons défini les sorties du système par rapport aux manques exprimés dans le chapitre II. L'accent a été mis sur la production de séries temporelles, à pas journalier, d'irradiation et d'éclairement pour un site géographique défini par l'utilisateur et pour une période de temps n'excédant pas une année. Une possible intégration dans le temps des paramètres a été prise en compte. La production automatique de cartes, ou tout au moins de matrices de valeurs géolocalisées, à pas journalier ou autre, a été écartée d'une part par manque d'intérêt exprimé par les usagers, et d'autre part, par crainte d'un long délai de réponse par le système en ligne. En fait, nous nous sommes aperçu avec le recul et après observation du fonctionnement du système pendant plus d'un an que le mûrissement du "marché" rendait la première objection plutôt obsolète. Les usagers utilisent beaucoup de logiciels de simulation lesquels requièrent des séries temporelles mais ces mêmes usagers sont assez favorables à une représentation cartographique de la distribution du rayonnement à une échelle mensuelle.

L'ensemble des sorties disponibles est :

- l'irradiation journalière,
- l'éclairement en moyenne journalière (c'est-à-dire 24 heures),
- l'indice de clarté journalier,
- la moyenne mensuelle de l'irradiation journalière,
- l'éclairement en moyenne mensuelle,
- l'irradiation sur 5 ou 10 jours,
- l'irradiation mensuelle

Enfin, quelle que soit la grandeur demandée, un paramètre quantifiant la fiabilité des estimations est fourni en sortie. Il est estimé en fonction du nombre de données utilisées pour calculer la grandeur physique concernée.

Il était tentant d'adopter une structure fonctionnelle en trois ensembles, similaire à la description logique faite ci-dessus. Nous aurions alors eu un premier ensemble opérationnel appliquant l'ensemble de la méthode Heliosat II aux images Meteosat à pas tri-horaire (voir plus loin, la description des images satellitaires) et calculant la somme journalière du rayonnement. Le deuxième ensemble aurait stocké cette information dans une base de données à pas journalier. Enfin, le troisième ensemble aurait exploité la base de données selon les requêtes, en produisant les grandeurs mentionnées ci-dessus. Cependant, un examen approfondi de l'ensemble des fonctions nécessaires au système a permis de concevoir une autre architecture fonctionnelle, certes plus complexe, mais offrant la possibilité d'apporter des corrections et améliorations importantes à la qualité de l'estimation du rayonnement, qui soient automatiquement applicables à l'ensemble des données sans pour autant modifier la base de données.

L'architecture fonctionnelle adoptée est en deux ensembles distincts, décrits par la figure III.1. Le premier ensemble (chaîne helioclim) concerne la chaîne opérationnelle de construction de la base de données et le serveur permettant d'y accéder, l'autre (helioclim-soda) concerne l'exploitation de cette dernière. Cette structure nous a amenés à appliquer opérationnellement Heliosat II en deux parties. Afin de formaliser cette division, nous appellerons Heliosat II-A la partie de la méthode qui calcule les indices d'ennuagement n (équation 3.1) ; la suite de l'algorithme assuré par le logiciel d'exploitation se nommera Heliosat II-B (équations 3.3 à 3.7).

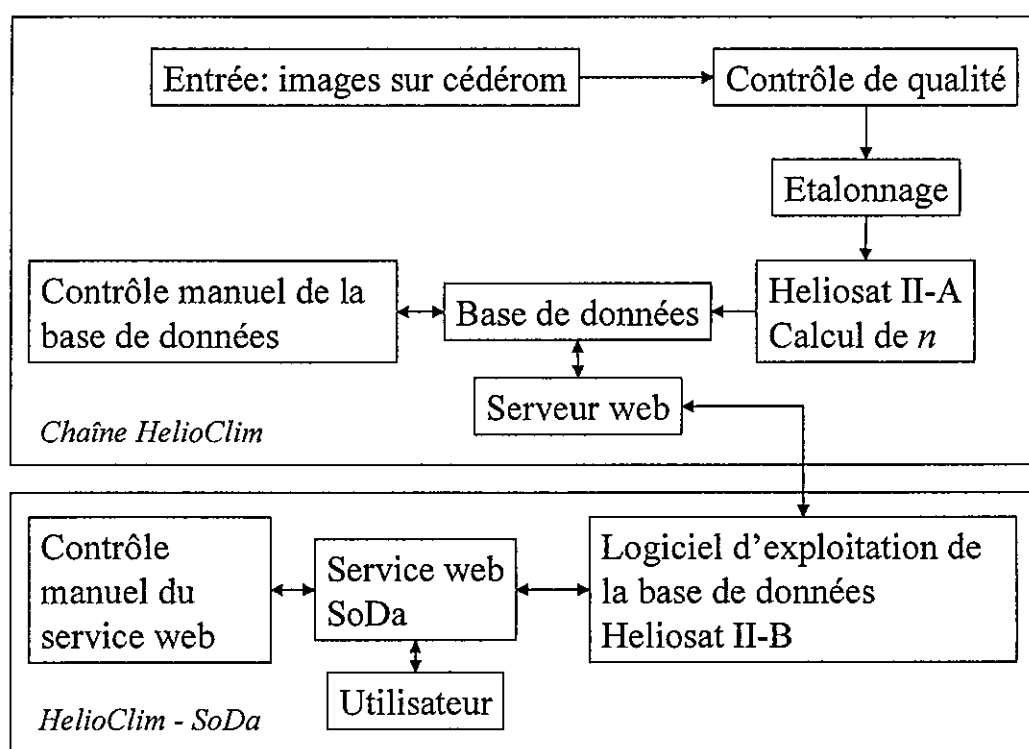


Figure III.1 : Structure générale d'HelioClim-1

La chaîne opérationnelle construisant la base de données débute par l'acquisition d'images satellitales. La qualité de ces images est vérifiée par un contrôle visuel. Ces images sont ensuite étalonnées. Le compte numérique de chacun des pixels est converti en luminance par les coefficients d'étalonnage. Les images étalonnées sont alors traitées par la méthode Heliosat II qui calcule un indice d'ennuagement n pour chacun des pixels de chaque image traitée. Ces valeurs sont stockées dans la base de données. Une copie de sécurité des données est effectuée sur cédérom. La plausibilité des données stockées est vérifiée manuellement sur quelques sites géographiques. La base de données est accessible par un serveur Web, déclaré lui-même comme ressource du service SoDa.

L'interface standard de SoDa enregistre la requête utilisateur et exécute le logiciel d'exploitation. Ce dernier extrait les données de la base de données selon la requête demandée. Il applique Heliosat II-B en convertissant l'indice d'ennuagement horaire en irradiation horaire puis calcule les quantités journalières, éventuellement intégrées dans le temps, selon la liste ci-dessus. Le service web fait l'objet d'un contrôle manuel régulier pour vérifier si ce dernier est disponible.

Pour l'école des mines, cette possibilité de modification est apparue comme un atout majeur du système que nous proposons. En effet, toute modification (correction ou amélioration) consisterait uniquement en une modification du logiciel d'exploitation de la base de données. Il n'y aurait alors pas lieu de reprendre la base de données et la modification est instantanément appliquée. On pourrait ainsi corriger les possibles erreurs de la méthode Heliosat II, qui, rappelons-le, était très récente au moment où les décisions ont été prises et n'avait pas été validée de nombreuses fois. Il serait aussi possible de modifier la loi de conversion entre les indices d'ennuagement n et l'indice de ciel clair, loi plutôt empirique et que des travaux effectués actuellement par d'autres laboratoires se proposent de modifier (Ramirez, communication personnelle). Enfin, nous pourrions également utiliser un autre modèle ciel clair sous réserve que ce dernier soit en cohérence avec celui utilisé pour calculer n , par exemple, avec une connaissance plus détaillée du trouble de Linke.

Par contre, l'adoption de cette architecture entraîne la nécessité de stocker des valeurs tri-horaires au lieu de journalières. Il y a donc augmentation du volume de stockage. L'exécution d'une partie de la méthode Heliosat II au moment de la requête en ligne entraîne également un délai de réponse mais celui-ci est apparu comme négligeable.

III.4 Données satellitales utilisées

Constituer une longue série temporelle du rayonnement sur une surface d'échelle planétaire nécessite l'acquisition et le traitement de nombreuses images, chacune représentant un important volume numérique. L'acquisition de ces images est relativement coûteuse. A titre d'exemple, la NASA fournit une année de données de chaque satellite GOES-E et GOES-W pour environ 20000 euros (Lefèvre *et al.* 2003).

Suite à un accord avec Eumetsat, nous disposons, tout d'abord à faible coût puis gratuitement, de toutes les images Meteosat produites depuis 1985 sous le format ISCCP-B2 ou « format B2 » ou encore IDS-B2 (Schiffer, Rossow, 1983, 1985). Il s'agit d'images de résolution réduite spatialement et temporellement. Tout d'abord, un sous-échantillonnage temporel a lieu pour réduire la fréquence des images d'une demi-heure à trois heures. Puis la taille de l'image

haute résolution du canal visible (5000 x 5000 pixels) est réduite à celles des images infrarouges (2500 x 2500 pixels) par un moyennage spatial. Ainsi l'image du canal visible d'un format initial de 5000 x 5000 pixels de 2,5 km de côté au nadir se transforme en une image de 2500 x 2500 pixels de 5 km de côté. Enfin, un sous-échantillonnage spatial des canaux visibles et infrarouges réduit finalement la taille des images à 416 x 416 pixels de 30 km de côté au nadir. Ce sous-échantillonnage spatial, ou «décimation», se fait en ne gardant qu'un pixel sur 6 dans toutes les directions, la valeur du pixel étant donnée par la valeur radiométrique du pixel sud-est de la fenêtre 6 x 6 (figure III.2).

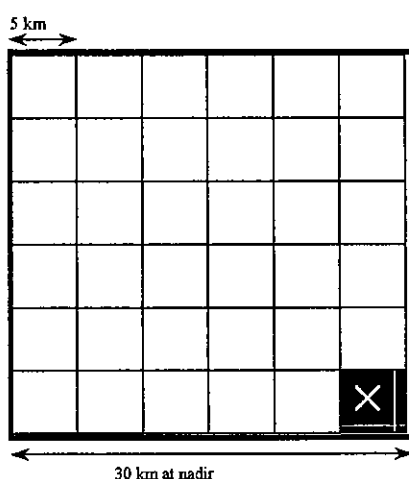


Figure III.2 : Schéma du sous-échantillonnage d'un pixel d'une image de résolution infrarouge (2500 x 2500) en pixel B2. Le pixel noirci du coin sud-est est celui conservé dans le format B2.

Ce format permet de réduire l'espace de stockage et donc de limiter les besoins en ressources informatiques bien que ce dernier point varie selon la politique de diffusion des données par Eumetsat. Il a également l'avantage d'être moins onéreux que les images de haute résolution par rapport aux images de haute résolution (temporelle et spatiale), le facteur de réduction du volume d'information est de 864. Lefèvre *et al.* (2003) et Rigollier *et al.* (2003) ont testé la méthode Heliosat II en comparant les évaluations produites par ce type d'image et des mesures au sol effectuées sur 35 stations de mesures en Europe. Les résultats sont présentés dans le tableau III.1. Ces résultats démontrent que la méthode Heliosat II est applicable sur les images B2 avec une précision satisfaisante. Ces images pourraient même être utilisées pour l'évaluation de l'irradiation horaire. Cependant, étant donné le faible pas d'échantillonnage temporel de ces images (1 image est produite toutes les 3 heures) et les précisions malgré tout limitées des estimations tri-horaires et des méthodes d'interpolation temporelle, il nous a semblé préférable de ne pas délivrer d'information de type horaire à partir de cette base de données, même si elle contient effectivement des données tri-horaires.

Type de donnée	Mois	Valeur moyenne	Ecart quadratique moyen	Coefficient de corrélation	Nombre de mesures
Irradiation horaire	Janvier 95	136	65	0.78	1767
	Avril 95	337	112	0.86	3097
	Juillet 94	539	128	0.82	3059
Irradiation journalière	Janvier 95	984	291	0.89	345
	Avril 95	3401	730	0.91	1044
	Juillet 94	5797	852	0.86	954
Somme sur 5 jours de l'irradiation (avec au moins 60 % de jours valides)	Janvier 95	4559	907	0.93	76
	Avril 95	17001	2242	0.94	209
	Juillet 94	28912	2914	0.86	203
Somme sur 10 jours de l'irradiation (avec au moins 60 % de jours valides)	Janvier 95	8792	1717	0.93	42
	Avril 95	33983	3990	0.94	105
	Juillet 94	57865	4862	0.84	101
Moyenne mensuelle de l'irradiation horaire	Janvier 95	140	41	0.87	56
	Avril 95	338	52	0.94	105
	Juillet 94	538	59	0.94	102
Moyenne mensuelle de l'irradiation journalière	Janvier 95	892	225	0.85	19
	Avril 95	3402	350	0.92	35
	Juillet 94	5792	399	0.86	34

Tableau III.1 : Résultats des comparaisons entre mesures au sol et estimations par la méthode Heliosat 2 appliquée sur des images B2 (valeurs en Wh.m^{-2}). D'après Rigollier *et al.* (2004)

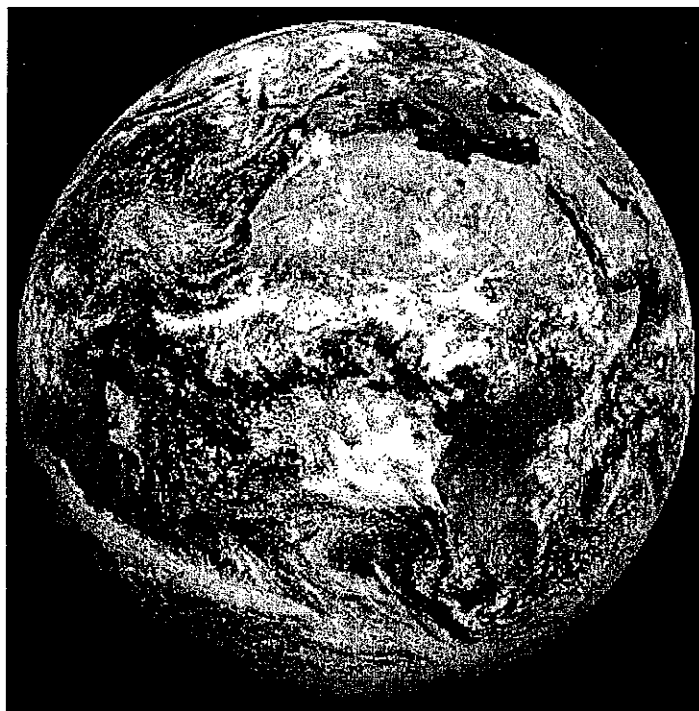


Figure III.3 : Image de Meteosat au format B2. Le champ de vue de ce satellite comprend l'Afrique, l'Europe et l'océan Atlantique.

Les images de Meteosat offrent un champ de vue d'environ un tiers de la surface terrestre, incluant l'Europe, l'Afrique et l'Océan Atlantique (figure III.3). Notre série d'images B2 comprend toutes les images produites depuis 1985. Cette donnée d'entrée de la chaîne de construction de la base de données d'HelioClim-1 permet de construire une série climatologique de plus de 20 années couvrant une échelle géographique planétaire.

III.5 Conception de la base de données

La série temporelle d'images B2 nous impose des contraintes à respecter pour la conception de la structure de la base de données. Les images ne sont disponibles que toutes les trois heures, tout comme les standards du World Weather Watch (WMO-WWW).

Le premier aspect majeur de la base de données concerne les grandeurs à stocker et le deuxième est le volume de stockage. Il y a un intérêt à rendre ce dernier le plus petit possible tout en gardant un accès très rapide. La base doit contenir toutes les informations nécessaires au calcul des quantités souhaitées par l'utilisateur. Il y a donc un compromis à trouver entre ces deux aspects. Il faut pour cela prendre en compte les demandes des utilisateurs, l'usage probable des estimations et les algorithmes de calcul, tant pour Heliosat II-B que pour les algorithmes d'interpolation spatiale et d'intégration dans le temps.

Pour des raisons de rapidité de réponse en ligne, nous avons écarté l'usage des techniques de compression. Nous avons travaillé sur les quantités à stocker et la représentation des trois dimensions associées : la grandeur, l'espace et le temps.

La grandeur à stocker *a minima* est l'indice d'ennuagement, enregistrable sur un octet. Pour effectuer les calculs ultérieurs, il est nécessaire de disposer également des informations relatives à son positionnement géographique (latitude, longitude) et dans l'image (ligne, colonne) ainsi que celles nécessaires à l'exécution du modèle de ciel clair (trouble de Linke, altitude du sol). Ces informations étant en fait indépendantes du temps, sachant que le trouble de Linke est disponible pour chacun des douze mois, elles seront stockées dans des tables à part. Par contre, le moment d'acquisition de l'image, donc de l'indice d'ennuagement, devra être connu à chaque instant. Toutes les quantités proposées à l'usager peuvent se déduire de cet indice d'ennuagement, y compris un indice de fiabilité de l'estimation, basé sur le nombre d'images disponibles pour calculer la quantité concernée.

En ce qui concerne le temps, l'échantillonnage temporel de la base de données se base sur celui du format B2. La cadence d'observation de Meteosat est de 30 minutes. Chaque instant d'observation est appelé un *slot*. En une journée, 48 slots sont produits par Meteosat dont 8 sont utilisés pour les données B2. Ces huit slots sont *a priori* toujours les mêmes, excepté dans le cas d'images défectueuses, pour lequel Eumetsat peut fournir une autre image de qualité correcte. Il est par conséquent nécessaire de stocker également le numéro du slot. Ces huit slots ne sont pas tous illuminés pour un pixel donné. Pour un pixel, nous aurions pu ne garder que les slots pour lequel le soleil éclairait ce pixel, afin d'économiser du volume de stockage. Ceci aurait nécessité une base de données avec des enregistrements de longueur variable, pour lesquels les accès sont un peu plus longs qu'avec des enregistrements de longueur fixe. Il eût également fallu noter le jour. Etant donné l'incertitude que nous avons sur le délai de réponse du système à une requête en ligne, nous avons opté pour la méthode la

plus simple, au détriment du volume de stockage, en nous promettant de revoir ce point pour les futures bases de données.

Chaque donnée est stockée comme un couple (temps, valeur). Le système de numérotation du slot permet de n'utiliser qu'un octet de mémoire pour stocker le temps. Le jour n'est pas stocké explicitement. Il est obtenu par une relation biunivoque entre le jour et l'adresse des séries de valeurs quotidiennes sachant que l'on a 8 couples de données par jour.

Les utilisateurs accèdent au service SoDa par un navigateur standard. La taille des données en sortie ne doit pas être trop importante. D'après les expériences avec d'autres services et ressources, un compromis entre la rapidité de la réponse, la bande passante, les besoins des utilisateurs et la qualité de l'interface correspond approximativement à fournir au maximum une année de valeurs journalières en données de sortie. Ceci définit la granularité de la base de données, qui sera constituée d'un ensemble de tables de données, une par année.

Les utilisateurs souhaitent une réponse en quasi-temps réel. L'extraction des données doit être aussi rapide que le permettent les ressources informatiques. Une grande majorité des utilisateurs préfèrent des séries temporelles pour un lieu géographique ponctuel et non des séries temporelles d'images. Nous avons donc décidé de renoncer à une structure d'image et de former la base de données de manière à faciliter la recherche d'une série temporelle pour un site géographique donné. Ce principe est déjà utilisé par ESRA (2000) et le serveur Satel-Light (Fontoynt *et al.* 1997).

L'image Meteosat de format B2 comprend 416 x 416 pixels. Parmi ceux-ci, nous avons rejeté tous ceux n'appartenant pas au disque terrestre vu par le satellite. Les pixels pour lesquels le satellite est vu sous un angle d'élévation inférieur à 15° ont été également éliminés, Heliosat II ne pouvant traiter correctement ces cas. La figure III.4 présente une image comportant les pixels restants, comparée à l'image d'origine. Les pixels restants sont étiquetés dans leur ordre d'emplacement en partant du « nord-ouest » de l'image. Un numéro que l'on nommera *identifiant* est attribué à chacun de ces pixels (figure III.5).

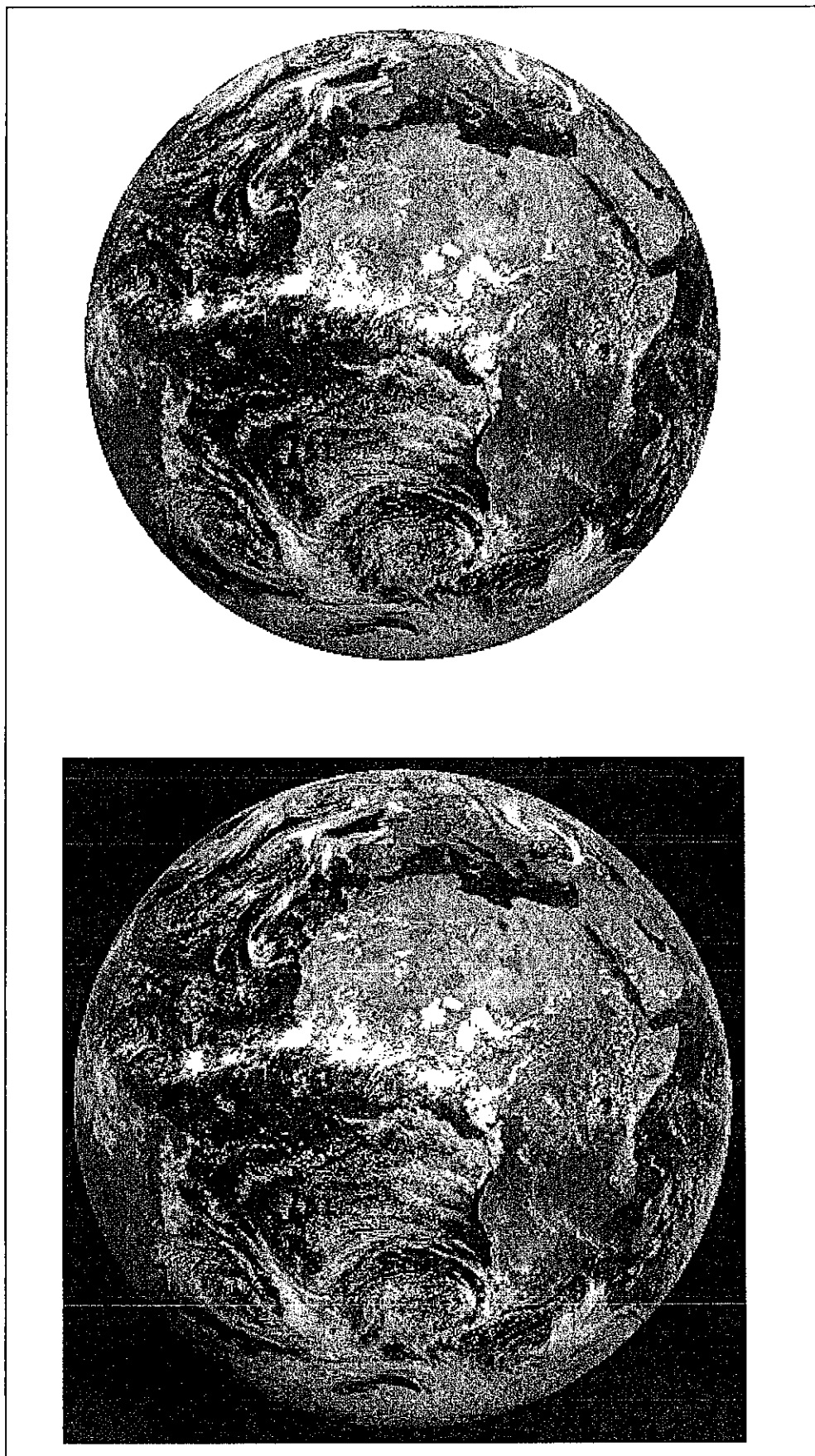


Figure III.4 : Image Meteosat après suppression des pixels inutilisables (en haut), comparée à son image originale (en bas).

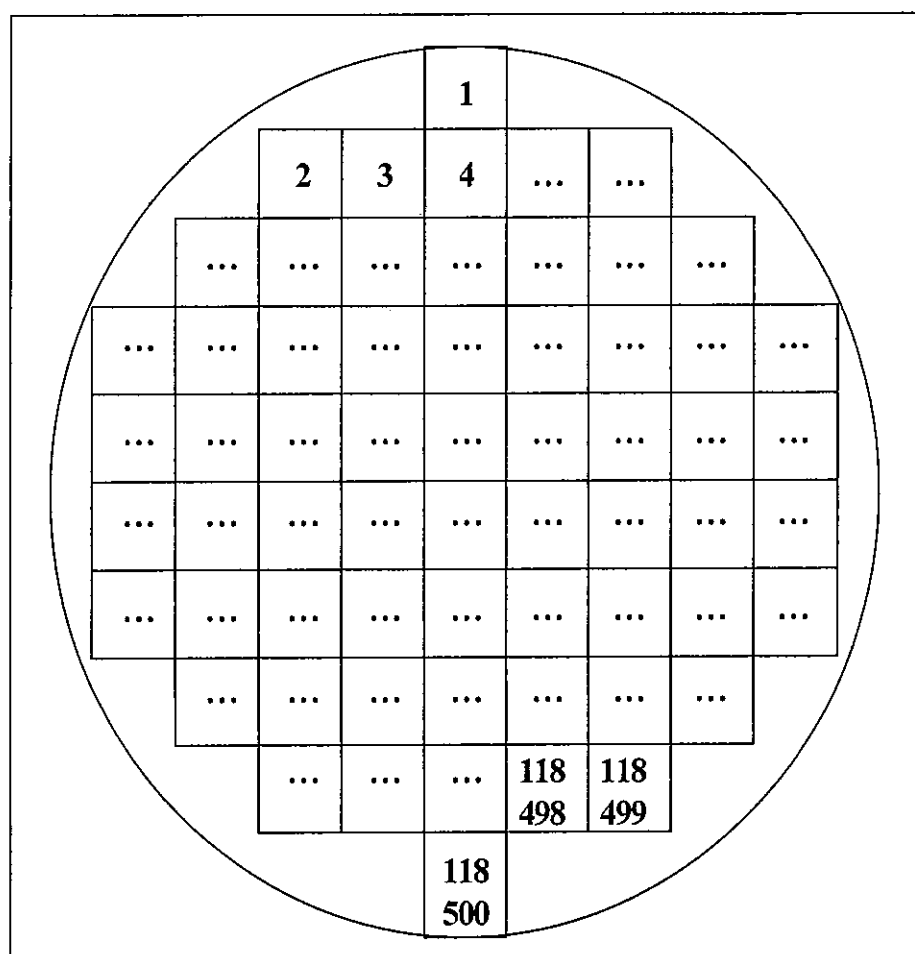


Figure III.5 : Identification des pixels sur une image B2. Chaque pixel utilisable du disque vu par Meteosat est numéroté par un identifiant de 1 à 118500.

Cette base de données équivaut alors à un ensemble de 118500 stations de mesure au sol représentées chacune par un pixel de 5 km de côté espacé de 30 km de ses quatre plus proches voisins si l'on se considère au nadir. En comparaison avec d'autres sources d'information, nous trouvons 70 sites fournissant des valeurs journalières sur une période similaire en Europe dans ESRA (2000), ainsi que 30 stations en Afrique avec des données journalières sur plus de 4 ans disponibles auprès de l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM). Le WRDC propose des données d'irradiation globale sur 1195 stations réparties à travers le monde. Le nombre de stations équivalentes dans notre base est donc nettement plus important que ces sources.

Par ailleurs, le SRB fournit des cartes mondiales de l'irradiation sur un support spatial de 280 km de côté. Restreinte à un tiers de la surface terrestre, notre base de données offre néanmoins une information sur le rayonnement solaire beaucoup plus détaillée en ce qui concerne la distribution spatiale du rayonnement.

Un fichier-table a été constitué afin de faire correspondre l'identifiant avec l'emplacement du pixel en lignes et colonnes du format B2, sa localisation géographique en latitude et longitude, son altitude et le trouble de Linke associé (figure III.6). Ceci évite toute redondance par le fait qu'un pixel n'aura besoin que de son identifiant pour déterminer tous ses attributs nécessaires à son traitement par Heliosat II. La redondance évitée entraîne ainsi un gain de place dans

l'espace-mémoire. Cette table sert également à l'exploitation de la base de données. Les coordonnées géographiques de la requête utilisateur sont converties en identifiant de pixel afin d'extraire plus rapidement les données associées à ce pixel. Ainsi pour chaque pixel nous pouvons extraire rapidement la valeur du trouble de Linke et l'élévation de terrain afin de convertir l'indice d'ennuagement n en irradiation horaire G_h , par le module Heliosat II-B. Ce fichier est en format binaire.

Identifiants des pixels B2	Attributs des pixels							
	Latitude	Longitude	No Ligne B2	No colonne B2	Altitude	Tl jan	...	Tl déc
1								
2								
...								
118499								
118500								

Figure III.6 : Contenu du fichier-table. Ce fichier fait correspondre l'identifiant de pixel avec ses attributs géographiques et climatiques (coordonnées géographiques, coordonnées sur image B2, altitude et douze moyennes mensuelles climatologiques du trouble de Linke).

Chaque année de la climatologie est représentée par un fichier de format binaire comprenant les 118500 pixels. Le fichier est constitué d'un enregistrement par station (pixel). Chaque enregistrement débute par l'identifiant suivi de 366 ensembles de 8 couples (temps, valeur) de données, soit 2928 champs. Chaque fichier contient alors approximativement un milliard de valeurs. La taille d'un fichier binaire contenant une année de données est à peu près de 0.7 giga-octets. La figure III.7 représente la disposition des données dans un fichier annuel.

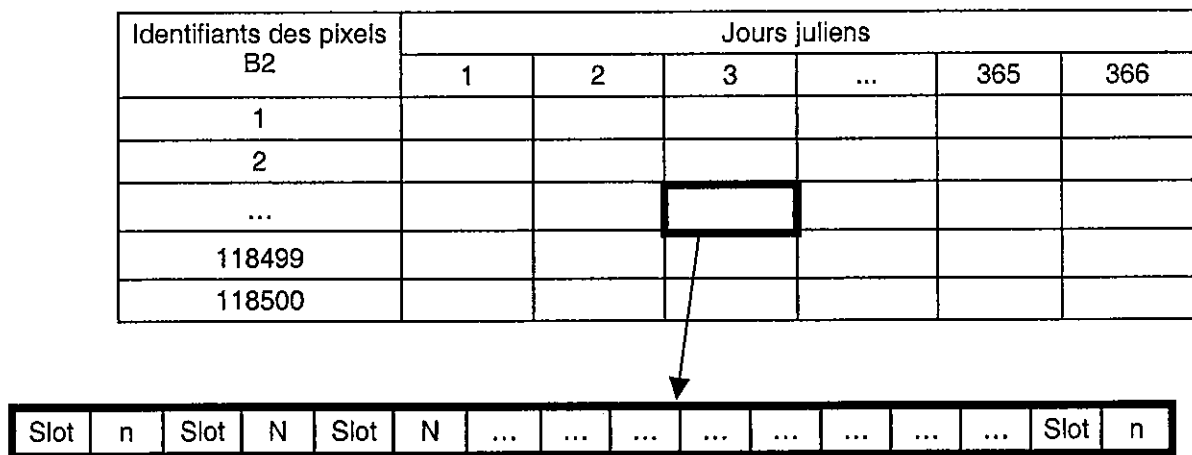


Figure III.7 : Configuration d'un fichier annuel de données : chaque enregistrement correspond aux informations fournies par un pixel B2 durant une année, chaque champ correspond à un jour de l'année. Chaque donnée contenue dans ce fichier est un ensemble de 8 couples de (slot, indice d'ennuagement)

III.6 Exploitation de la base de données

L'exploitation de la base de données et la fourniture de la réponse aux requêtes utilisateurs sont données ici à titre informatif, puisque je n'avons pas eu l'occasion d'apporter une innovation sur ce thème. De manière générale, à cause de mon séjour à l'université d'Oldenburg, je ne suis pas allé plus loin que la définition des concepts et l'architecture fonctionnelle et l'écriture des spécifications. L'ensemble des logiciels a été écrit par Mireille Lefèvre.

Une fois la requête utilisateur effectuée au moyen de SoDa, une procédure, appelée Helio_Gd est lancée par le serveur propre à la base de données. Le principe d'exécution de cette procédure est décrit par la figure III.8. Nous avons sur la gauche du schéma, la liste des entrées données par l'utilisateur. Les coordonnées géographiques sélectionnées déterminent un site non nécessairement situé sur un pixel B2. Une interpolation spatiale est alors nécessaire. Pour cela, Helio_Gd identifie les 9 pixels B2 les plus proches du site requis à l'aide du fichier table décrit à la figure III.6. Une série temporelle d'indices d'ennuagement correspondant à la période sélectionnée par l'utilisateur est extraite de la base de données pour chacun de ces 9 pixels. Ces indices d'ennuagement sont convertis en irradiation journalière G_d par Heliosat II-B. Les 9 valeurs de G_d correspondant à une même journée sont interpolées spatialement. L'interpolation choisie est celle décrite par Lefèvre *et al.* (2002). Il s'agit d'une interpolation de type « gravité » dont la distance effective entre les points à interpoler est fonction de la distance géodésique, de l'orographie et de la différence entre les latitudes des points à interpoler.

Lefèvre *et al.* (2002) ont comparé cette distance à plusieurs autres et en ont obtenu les meilleurs résultats. Il existe évidemment d'autres techniques plus élaborées, comme par exemple le krigeage. Nous ne les avons pas retenues car une propriété importante de l'interpolation est la rapidité du calcul. En effet, Helio_Gd doit effectuer autant d'interpolations que d'ensembles de 9 données extraites de la base de données pour toute la période temporelle requise par l'utilisateur. Nous rappelons que nous avons 8 groupes de 9 données à extraire par jour sélectionné. Une requête demandant un résultat sur une année de données nécessite par conséquent près de 3000 calculs d'interpolation. Ceux-ci doivent être effectués durant l'interrogation de la base de données qui doit être assez rapide pour pouvoir fournir à l'utilisateur un service quasiment instantané. Lefèvre (communication personnelle) a par ailleurs obtenu de meilleurs résultats vis-à-vis d'une comparaison avec des mesures faites au sol, avec cet interpolateur qu'avec le choix du pixel B2 le plus proche ou une interpolation similaire mais avec la distance géodésique sans correction de latitude et d'orographie.

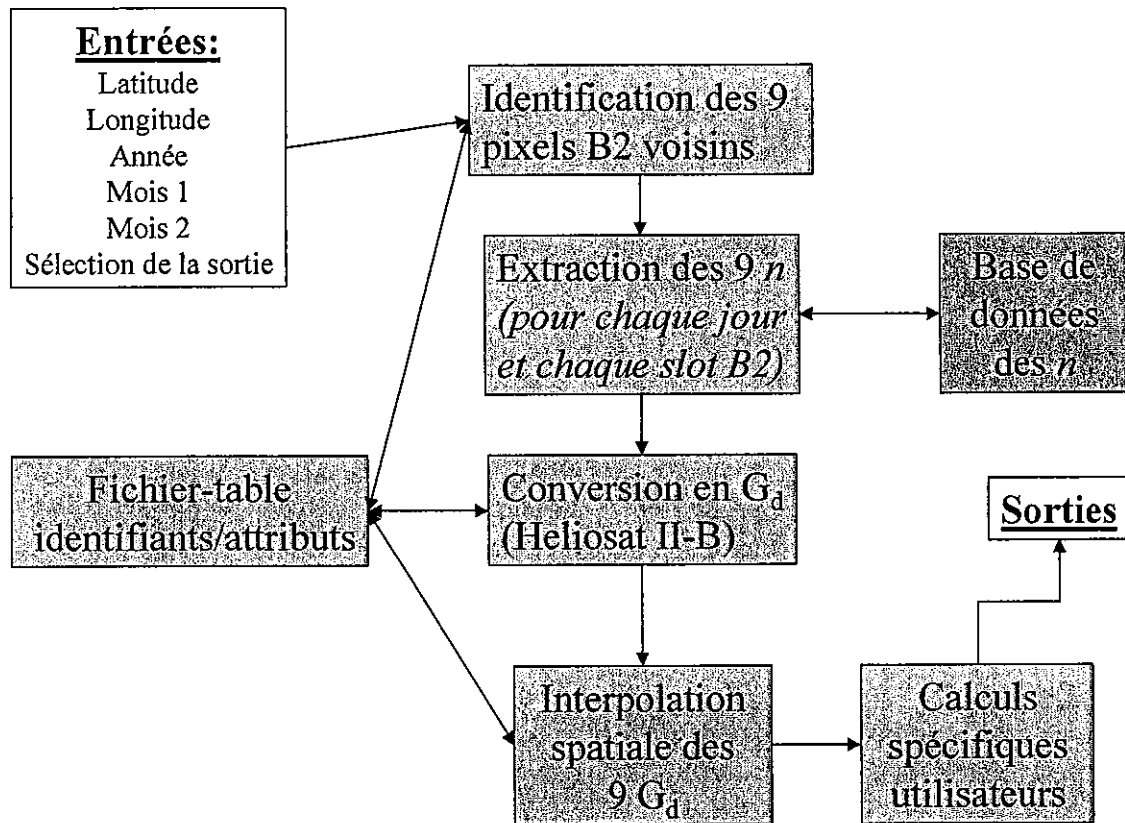


Figure III.8 : Principe d'exécution d'Helio_Gd, le module d'exploitation de la base de données

Les valeurs spatialement interpolées des G_d correspondants donc au point géographique effectivement requis par l'utilisateur sont ensuite éventuellement converties en grandeurs choisies par l'utilisateur. Le flot d'information est transmis à SoDa qui le re-formate pour le délivrer à l'usager.

III.7 Etalonnage, problèmes rencontrés

L'application opérationnelle d'Heliosat II-A, pour calculer les indices d'ennuagement contenus dans la base de données, a nécessité au préalable d'étalonner les images. Cette partie relate les difficultés rencontrées dues à l'étalonnage des images Meteosat.

Les comptes numériques de chaque pixel des images Meteosat ne sont équivalents à aucune grandeur physique. L'étalonnage permet de les convertir en luminance par une fonction de la forme suivante (Lefèvre *et al.* 2000):

$$L^t = a^t(CN^t - CN_{dark}^t) + b^t \quad (3.8)$$

où CN^t est la valeur du compte numérique observé à un instant t . a^t , CN_{dark}^t et b^t sont respectivement le coefficient d'étalonnage, le compte numérique d'une cible sombre et l'offset du capteur. L^t est la luminance donnée par cette fonction pour cet instant t .

L'Agence Spatiale Européenne (ESA) et Eumetsat réalisent régulièrement des mesures parfaitement étalonnées permettant le calcul précis de coefficients d'étalonnage pour une période limitée (Kriebel 1981 ; Kriebel et Amann 1993 ; Kriebel *et al.* 1996). Avant août 2003, Eumetsat ne proposait pas de coefficients d'étalonnage du canal visible ajustés de manière dynamique dans le cadre de leur distribution de produits météorologiques et fournissait des séries de coefficients sur une base annuelle.

Pour la période comprise entre 1985 et 1997, étant donnée l'importante fréquence des changements de capteur pour la série Meteosat depuis 1985 (31 changements de capteurs sur une série de 5 différents satellites, de Meteosat-3 à Meteosat-7 – ces changements incluent les remplacements temporaires des capteurs défectueux par leur « prédécesseur »), Rigollier *et al.* (2002) ont jugé que l'utilisation des coefficients d'étalonnage annuels fournis par Eumetsat n'était pas appropriée. L'échantillonnage temporel devant être beaucoup plus important, ils ont choisi la méthode de Lefèvre *et al.* (2000) afin de calculer des coefficients d'étalonnage quotidiens. Ils ont procédé à plusieurs modifications de cette méthode et l'ont appliqué de manière opérationnelle sur toutes les images de la période de 1985 à 1997. Des jeux de coefficients (a , b et CN_{dark}) ont été calculés pour chaque jour de cette période. Ces coefficients sont disponibles *via* le serveur web <http://www.helioclim.net/>. Nous les avons utilisés pour calculer les valeurs contenues par HelioClim, pour la période comprise entre 1985 et 1997 inclus.

Depuis début 1998, il n'y a eu qu'un seul changement de capteur, Meteosat-7 étant resté opérationnel depuis ce moment. Ainsi, le choix de Rigollier *et al.* (2002) d'utiliser des coefficients quotidiens n'est plus justifié. Comme l'application de cette méthode d'étalonnage nécessite un coût de temps et de ressources informatiques et humaines non négligeables, l'utilisation des coefficients d'étalonnage annuels d'Eumetsat calculés selon Govaerts *et al.* (1998) nous a semblé préférable. De plus, Rigollier *et al.* (2002) indiquent que l'étalonnage par Eumetsat donne des résultats très similaires à la leur, dès lors qu'il n'y a pas eu de changements de capteurs sur la période de comparaison.

Pour la période comprise entre janvier et juin 1998, le capteur Meteosat-6 était en service. Un jeu constant de coefficients d'étalonnage a été calculé par Eumetsat. Nous avons choisi de l'appliquer aux images satellitales produites du 1^{er} janvier au 3 juin 1998. Dans ce cas, la formule à utiliser est:

$$L = \mu(CN - CN_0) \quad (3.9)$$

Cependant, la série d'images produites depuis le 3 juin 1998 par Meteosat-7 a fait l'objet d'une étude récente menée par Eumetsat (2003), laquelle a montré une variation linéaire continue de la sensibilité du capteur. Grau *et al.* (2002) ont également signalé ce phénomène. Eumetsat (2003) a alors proposé une série de coefficients d'étalonnage disponibles tous les quatre mois, sur une période comprise entre la mise en service de Meteosat-7 et août 2002. Ces coefficients ont été calculés à partir de la méthode de Govaerts *et al.* (2001). Le site web d'Eumetsat propose également une formule analytique permettant de calculer le coefficient $\mu(t)$ pour chaque jour :

$$\mu(t) = \mu_0 + (D_f N_f 10^{-5}) \quad (3.10)$$

où:

- μ_0 est le coefficient d'étalonnage à la date de lancement de Meteosat-7 (2 septembre 1997),
- D_f est le coefficient journalier de variation de la réponse du capteur,
- N_f est le nombre de jours écoulés depuis le lancement du satellite.

Cette formule a été calculée par ajustement aux coefficients calculés tous les quatre mois. Nous avons vérifié la concordance entre les valeurs issues de la formule analytique et les coefficients quadrimensuels. Les différences entre ces deux séries de données sont négligeables pour notre application (on note une différence relative maximale de 2% sur l'irradiation globale journalière, quelle que soit la valeur du compte numérique). L'utilisation d'une formule analytique est plus avantageuse d'un point de vue opérationnel. Pour la période postérieure à juin 1998, nous avons finalement appliqué les valeurs des coefficients calculées à partir de (3.9).

Une première construction d'HelioClim a été menée avant qu'Eumetsat (2003) ne propose ces nouveaux coefficients d'étalonnage. Pour cette première version d'avant septembre 2003, nous avons appliqué le jeu de coefficients constants préconisé par Eumetsat (1998). Suite à ces modifications, nous avons reconstruit la base de données à partir de 1998, avec les nouveaux coefficients.

Quelle influence sur les valeurs de rayonnement journalier ? Pour cela, nous avons comparé les moyennes annuelles de l'irradiation globale journalière entre la nouvelle version et l'ancienne, de janvier 1998 à septembre 2003 pour le site, choisi arbitrairement, de coordonnées (45°N ; 1°E). Le tableau III.2 présente les résultats de cette comparaison.

Année	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Nombre de jours pris en compte	318	315	313	315	317	263
Valeur moyenne (Wh/m ²)	3574	3382	3447	3363	3219	4209
Différence moyenne (Wh/m ²)	-49	-149	-228	-299	-373	-400
Différence moyenne relative	-1 %	-4 %	-6 %	-8 %	-10 %	-10%

Tableau III.2 : Résultats du test d'influence du changement de coefficients d'étalonnage de Meteosat-7 pour la période postérieure à 1997.

Les différences moyennes résultent de la soustraction entre les valeurs calculées avec les coefficients d'Eumetsat (2003) et les anciennes. Nous en déduisons que l'utilisation des anciens coefficients d'Eumetsat (1998) conduit à une sur-estimation systématique de

l'irradiation globale journalière. Cette sur-estimation croît avec le temps et devient notable après une année.

Chapitre IV

Validation d'HelioClim-1

Une fois la base de données d'HelioClim-1 créée, il est nécessaire de procéder à l'évaluation de sa qualité afin de permettre aux usagers d'utiliser ces estimations en toute connaissance. Pour ce faire, nous allons procéder de manière standard, c'est-à-dire en effectuant une comparaison avec des mesures effectuées par des pyranomètres au sol. Nous testerons également l'influence de divers paramètres sur cette qualité.

IV.1 Comparaisons entre les données d'HelioClim-1 et les données *in-situ*

Pour évaluer la qualité des données d'HelioClim-1, nous allons procéder à des comparaisons entre des séries temporelles de mesures faites en stations météorologiques au sol et des séries temporelles fournies par HelioClim-1 aux mêmes sites géographiques.

En comparant les données *in-situ* et les données d'HelioClim-1, nous considérons les secondes exactes si elles sont strictement identiques aux premières pour un même jour et un même point. Cependant, les deux séries de données sont issues de procédés déterminant l'irradiation globale journalière à partir de supports spatiaux et temporels différents. Le pyranomètre permet de déterminer une somme journalière à partir de mesures continues de l'éclairement durant une journée sur un plan horizontal considéré comme ponctuel, tandis que l'irradiation journalière fournie par HelioClim-1 résulte de la somme des éclairissements fournis par chacune des 5 images de format B2 disponibles en une journée. Comme le point considéré n'est pas forcément inclus dans un pixel B2, ces 5 éclairissements quotidiens proviennent de l'interpolation spatiale des 9 pixels les plus proches de ce point. Par conséquent, outre les incertitudes intrinsèques à la méthode Heliosat II, les données issues d'HelioClim-1 ont plusieurs raisons de ne pas être exactement identiques aux données *in-situ*.

En effet, l'intervalle de 3 heures entre chaque acquisition d'une image peut présenter des variations significatives de l'état optique de l'atmosphère au-dessus du point considéré. La somme journalière de l'irradiation calculée à partir de 5 images ne peut prendre en compte les variations temporelles de l'état optique de l'atmosphère d'une échelle inférieure à celle de l'intervalle entre 2 images. De plus, les images B2 défectueuses ayant été éliminées lors de la réalisation d'HelioClim-1, l'incertitude des données satellitales peut varier en fonction du nombre d'images disponibles en une journée. Nous en tiendrons compte dans la suite.

Le support spatial de l'information délivrée par HelioClim-1 est d'environ 10 km sous nos latitudes. Ainsi, comparer une donnée d'HelioClim-1 et une donnée de pyranomètre équivaut à comparer la valeur d'une zone spatialement moyennée avec une valeur ponctuelle. La taille de la zone moyennée a une forte influence sur la différence mesurée (Pinker et Laszlo 1991). D'autres travaux non publiés ont trouvé des conclusions similaires et ont démontré qu'il n'existe pas une taille unique donnant les meilleurs résultats pour une même région. Il est possible d'avoir de bons résultats avec une taille donnée dans un cas donné et d'avoir des résultats moins précis dans un autre cas avec la même taille. L'erreur dépend des variations locales de l'état optique de l'atmosphère (Zelenka *et al.* 2003). L'interpolation spatiale entre les 9 plus proches pixels du point considéré est également une source possible d'erreur. Beyer *et al.* (1992) ont suggéré que la variance locale de l'irradiation peut être une mesure de l'hétérogénéité spatiale. Ces variations sont en principe fortement liées avec les conditions climatiques autour du point considéré (Perez *et al.* 2002). Enfin, la distance utilisée pour interpoler les données satellitales dépend de la latitude et de l'altitude (Lefèvre *et al.* 2002).

Cette distance est plus petite vers l'équateur et plus grande vers les pôles. Les conditions climatiques locales, la variance locale de l'irradiation, l'altitude, la latitude et la longitude doivent être prises en compte dans la comparaison des données.

IV.2 Collecte et contrôle des données d'irradiation globale journalières mesurées au sol

Les séries temporelles de mesure *in-situ* doivent être sélectionnées dans un réseau de stations météorologiques compris dans la zone couverte par HelioClim-1. Ce réseau doit avoir des points de mesures dans des situations géographiques et climatiques les plus diverses (montagneuses, tropicales, désertiques, tempérées, maritimes ...) de manière à obtenir des incertitudes les plus représentatives de la diversité des conditions géographiques disponibles. En plus de contenir les données de toutes les saisons, les séries temporelles doivent être aussi longues que possible afin de vérifier la qualité des données d'HelioClim-1 sur l'ensemble de sa couverture temporelle.

Comme nous l'avons évoqué au paragraphe II.1.2, obtenir un tel ensemble de données de stations au sol n'est pas toujours simple. En effet, la taille de la zone couverte par HelioClim-1 implique de commander des données auprès de nombreux bureaux météorologiques nationaux. Ce procédé prend un délai d'une durée imprévisible car il dépend du temps de réponse de chacun des bureaux et plusieurs relances sont souvent nécessaires. Par exemple, les bureaux d'Israël et d'Afrique du Sud n'ont jamais répondu à nos commandes. Le format ou les unités des données peuvent varier d'un bureau à l'autre et ceci impose un travail fastidieux de mise en forme standardisée des données. Enfin, les coûts peuvent être très élevés : les bureaux du Royaume-Uni et de l'Irlande demandent près de 1000 euros pour 19 années de données pour une seule station de mesure. Par comparaison, Météo-France accorde 6 années de données sur une vingtaine de stations pour moins de 150 euros aux chercheurs et aux enseignants. Pour le même nombre d'années de données sur une dizaine de stations, le bureau allemand demande 60 euros.

Cependant, le WRDC propose un accès gratuit et centralisé sur le web à des données d'irradiation globale journalière sur 1195 stations à travers le monde (cf. figure I.1) pour une période comprise entre 1966 et 1993. Nous avons également à notre disposition des séries temporelles d'irradiation journalière sur 88 stations en Europe et en Afrique du Nord entre 1981 et 1990 provenant de l'atlas européen du rayonnement solaire (ESRA 2000) avec l'aimable autorisation de l'éditeur. Désireux d'obtenir des séries temporelles de 1985 à 2004, nous nous sommes contentés pour des raisons de temps et de coût, de séries temporelles comprises entre 1985 et 1990 provenant du WRDC et de ESRA.

Au départ, les données de 328 stations ont été rassemblées. Sur un ensemble aussi vaste de stations, il n'est pas rare de trouver des données defectueuses ou erronées provenant de stations comportant des pyranomètres mal étalonnés ou mal entretenus. Nous avons procédé à un contrôle de plausibilité des données avec une procédure proposée par Geiger *et al.* (2003). Elle compare l'irradiation globale G_d mesurée par une station avec l'irradiation globale G_{cd} simulée au même lieu et même jour par le modèle ciel clair utilisé par Heliosat II. La donnée est considérée non plausible si elle ne respecte pas l'une des trois conditions suivantes pour un point donnée (i,j) de la surface terrestre:

- $G_d(i,j) < G_{od}(i,j)$
- $G_d(i,j) < 1,2 G_{cd}(i,j)$
- $G_d(i,j) > 0,03 G_{od}(i,j)$

G_{od} étant l'irradiation globale calculée au sommet de l'atmosphère.

Nous avons appliquée cette procédure à l'ensemble des séries temporelles de données *in-situ* que nous avons sélectionné. Environ 10 % des données *in-situ* toutes stations confondues n'étaient pas plausibles. Nous avons également remarqué que de nombreuses stations parmi notre sélection présentaient, sur les 6 années, beaucoup de données non-plausibles. Nous avons exigé que chaque station comprenne au moins 4 ans de données plausibles pour des raisons de représentativité statistique. Nous avons donc éliminé les stations inappropriées de notre sélection dont le nombre est passé de 328 à 181.

Nous avons ensuite comparé individuellement chacune de ces stations avec la série temporelle d'HelioClim-1 extraite pour le même site géographique. Nous avons utilisé l'expérience acquise par des expérimentations similaires précédentes sur les méthodes Heliosat I et II (Hammer 2000 ; Rigollier *et al.* 2004), à savoir que l'on observe généralement:

- un coefficient de corrélation supérieur à 0,5,
- un biais relatif compris entre -10 et 10 %,
- un écart quadratique moyen (EQM) inférieur à 30 %.

La comparaison répond à ces critères lorsque l'on considère l'ensemble des données de ces 181 stations. Cependant, la situation peut être très différente pour certaines stations. La figure IV.1 montre des histogrammes de différences pour deux stations, l'une "normale" (à gauche) et l'autre sujette à caution (à droite). On remarque à gauche que l'histogramme est pointu et de dynamique restreinte alors qu'à droite l'histogramme est plutôt irrégulier, peu élevé et très étendu. Parmi ces stations sujettes à caution, certaines sont situées en zone montagneuse de type alpin sur des points culminants. Cette condition géographique présente une difficulté pour HelioClim-1. En effet, l'interpolation spatiale, bien qu'utilisant les différences d'élévation, ne peut rendre compte de phénomènes orographiques très locaux. Conscients de ce problème particulier aux zones montagneuses, nous avons éliminé ces stations de notre liste. Les autres stations sont toutes situées en Afrique, notamment à Madagascar, au Soudan et au Zaïre. Elles présentent la particularité d'offrir des séries temporelles observées peu variables dans le temps. En utilisant la carte des climats solaires proposée par Diabaté *et al.* (2004), nous les avons comparé à d'autres stations de climat similaire. Leur comportement s'avérant différent, nous avons décidé de les retirer de notre liste.

Nous obtenons finalement un ensemble de données de 162 stations sur 6 années (tableau IV.1). Nous avons jugé cet ensemble largement suffisant pour valider HelioClim-1. Les points de mesures sont convenablement répartis à travers la zone couverte par HelioClim-1. Ce réseau couvre des situations géographiques variées. L'océan Atlantique n'est pas couvert car il ne comporte quasiment pas de stations de mesure.

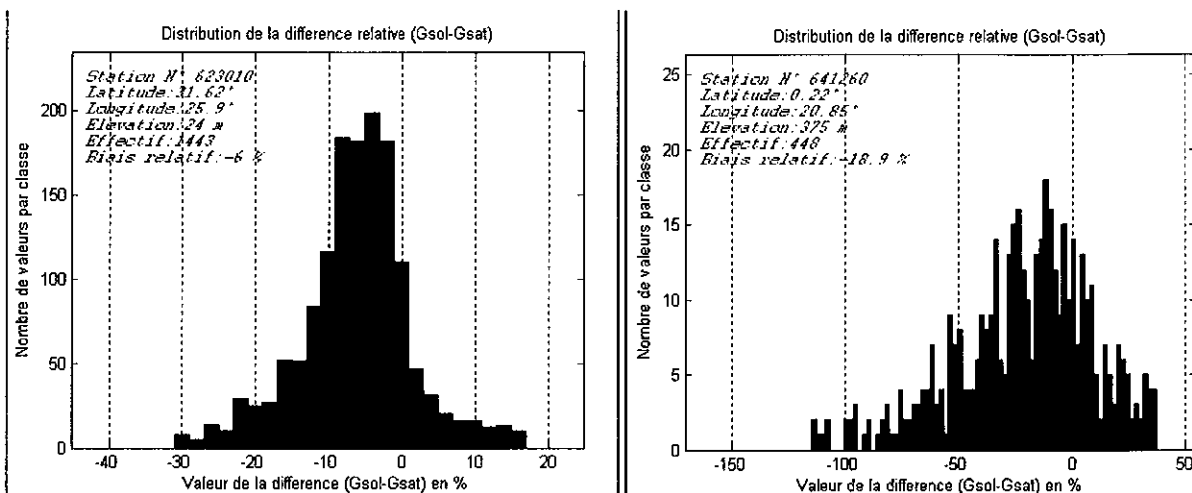


Figure IV.1 : Exemple d'histogrammes des différences pour deux stations. A gauche, une station « normale », à droite un histogramme irrégulier correspondant à une station zairoise rejetée de notre liste.

Tableau IV.1 : Liste des stations utilisées pour la comparaisons. Les coordonnées géographiques des sites sont exprimées en degrés décimaux, positifs vers le nord pour la latitude, positif vers l'est pour la longitude)

Latitude	Longitude	Altitude (m)	Ville	Pays
38,67	-27,22	74	ANGRA DO HEROISMO	ACORES
52,30	10,45	83	BRAUNSCHWEIG	ALLEMAGNE
53,05	8,80	3	BREMEN	ALLEMAGNE
51,80	10,62	1142	BROCKEN / HARZ	ALLEMAGNE
51,12	13,68	246	DRESDEN - WAHNDORSFF	ALLEMAGNE
48,00	7,85	308	FREIBURG	ALLEMAGNE
52,37	13,08	107	POSTDAM	ALLEMAGNE
48,40	11,70	472	WEIHENSTEPHAN	ALLEMAGNE
-6,60	20,82	775	DUNDO	ANGOLA
-7,15	13,23	74	LUANDA	ANGOLA
47,80	13,00	434	SALZBURG	AUTRICHE
48,25	16,37	203	WIEN	AUTRICHE
50,98	3,83	15	MELLE	BELGIQUE
50,80	4,35	100	UCCLE	BELGIQUE
42,20	25,33	173	CHIRPAN	BULGARIE
42,82	23,38	586	SOFIA OBS.	BULGARIE
45,82	16,03	123	ZAGREB	CROATIE
55,67	12,30	28	COPENHAGEN	DANEMARK
23,97	32,78	192	ASWAN	EGYPTE
27,20	31,17	52	ASYUT	EGYPTE
30,13	31,25	17	BAHTIM	EGYPTE
30,08	31,28	33	CAIRO	EGYPTE
31,08	33,75	31	EL ARISH	EGYPTE
25,45	30,53	78	EL KHARGA	EGYPTE
31,33	27,22	25	MERSA MATRUH	EGYPTE
31,62	25,90	24	SIDI BARRANI	EGYPTE
30,65	30,70	16	TAHRIR	EGYPTE
38,00	-1,17	61	MURCIA	ESPAGNE
8,98	38,80	2324	ADDIS ABABA	ETHIOPIE
60,32	24,97	51	HELSINKI	FINLANDE
63,43	21,07	4	VALASSAARET	FINLANDE

Latitude	Longitude	Altitude (m)	Ville	Pays
44,83	-0,70	49	BORDEAUX	FRANCE
47,07	2,37	161	BOURGES	FRANCE
45,78	3,17	332	CLERMONT-FERRAND	FRANCE
46,15	-1,15	4	LA ROCHELLE	FRANCE
43,65	7,20	4	NICE	FRANCE
42,73	2,87	43	PERPIGNAN	FRANCE
48,77	2,02	168	TRAPPES	FRANCE
41,68	44,95	490	TBILISI	GEORGIE
9,03	-1,52	299	BOLE	GHANA
6,72	-0,40	287	KUMASI	GHANA
7,75	-1,90	339	WENCHI	GHANA
39,17	21,00	10	ARTA	GRECE
35,33	25,18	37	HERAKLION	GRECE
40,52	22,97	8	THESSALONIKI	GRECE
47,43	19,18	138	BUDAPEST	HONGRIE
46,87	20,53	85	SZARVAS	HONGRIE
53,43	-6,25	68	DUBLIN	IRLANDE
54,23	-10,00	9	BELMULLET	IRLANDE
55,37	-6,67	20	MALIN HEAD C.	IRLANDE
32,00	34,82	30	BET DAGAN	ISRAEL
44,53	11,30	36	BOLOGNA	ITALIE
46,47	11,33	241	BOLZANO	ITALIE
40,65	17,95	10	BRINDISI	ITALIE
41,80	12,55	105	ROMA / CIAMPINO	ITALIE
0,53	35,28	2120	ELDORET	KENYA
0,47	39,63	138	GARISSA	KENYA
-0,10	34,75	1157	KISUMU	KENYA
1,02	35,00	1890	KITALE	KENYA
3,12	35,62	506	LODWAR	KENYA
-2,77	40,10	20	MALINDI	KENYA
3,93	41,87	230	MANDERA	KENYA
-0,68	36,92	1624	NAIROBI	KENYA
-0,70	36,75	1798	NAIROBI	KENYA
0,27	36,10	1901	NAKURU	KENYA
-0,87	35,83	1890	NAROK	KENYA
-2,60	38,57	579	VOI	KENYA
54,88	23,88	73	KAUNAS	LITUANIE
49,62	6,22	376	LUXEMBURG	LUXEMBOURG
32,37	-6,40	468	BENI MELLAL	MAROC
33,57	-7,67	57	CASABLANCA	MAROC
-18,20	34,90	10	BEIRA	MOZAMBIQUE
-18,88	33,47	731	CHIMOIO	MOZAMBIQUE
-23,48	33,00	33	CHOKWE	MOZAMBIQUE
-22,13	35,38	14	INHAMBANE	MOZAMBIQUE
-14,97	40,67	10	LUMBO	MOZAMBIQUE
-23,27	33,53	13	MANIQUENIQUE	MOZAMBIQUE
-24,03	32,60	70	MAPUTO	MOZAMBIQUE
-14,90	39,28	438	NAMPULA	MOZAMBIQUE
-11,03	40,50	49	PEMBA	MOZAMBIQUE
-15,82	33,58	123	TETE	MOZAMBIQUE
-25,95	32,38	12	UMBELUZI	MOZAMBIQUE
6,32	5,60	79	BENIN CITY	NIGERIA
0,60	0,05	41	BERGEN	NORVEGE
24,23	55,78	299	BURAIMI	OMAN
52,10	5,18	2	DE BILT	PAYS-BAS
52,92	4,78	0	DE KOOY	PAYS-BAS
53,13	6,58	4	EELDE	PAYS-BAS

Latitude	Longitude	Altitude (m)	Ville	Pays
50,92	5,78	114	MAASTRICHT	PAYS-BAS
51,45	3,60	8	VLISSINGEN	PAYS-BAS
54,52	18,55	22	GDYNIA	POLOGNE
52,28	20,97	98	WARSZAWA	POLOGNE
49,30	19,95	857	ZAKOPANE	POLOGNE
38,57	-7,90	309	EVORA	PORTUGAL
41,13	-8,60	93	PORTO	PORTUGAL
49,07	13,62	1122	CHURANOV	REPUBLIQUE TCHEQUE
49,80	18,25	242	OSTRAVA / PORUBA	REPUBLIQUE TCHEQUE
50,07	14,42	262	PRAHA / KARLOV	REPUBLIQUE TCHEQUE
46,78	23,57	410	CLUJ - NAPOCA	ROUMANIE
44,22	28,63	13	CONSTANTA	ROUMANIE
57,20	-2,17	220	AVIEMORE	ROYAUME-UNI
51,38	0,78	74	BRACKNELL	ROYAUME-UNI
50,22	-4,68	87	CAMBORNE	ROYAUME-UNI
52,68	1,68	13	HEMSBY	ROYAUME-UNI
56,45	-2,93	30	MYLNEFIELD	ROYAUME-UNI
54,65	-6,22	81	BELFAST / ALDERGROVE	ROYAUME-UNI
52,27	0,57	75	BROOM'S BARN	ROYAUME-UNI
55,32	-3,20	242	ESKDALEMUIR	ROYAUME-UNI
60,13	-1,18	82	LERWICK	ROYAUME-UNI
51,52	-0,12	77	LONDON	ROYAUME-UNI
56,43	-2,87	4	SHANWELL	ROYAUME-UNI
55,75	37,57	156	MOSCOW	RUSSIE
59,97	30,30	4	ST.PETERSBURG	RUSSIE
14,70	-15,53	20	BAMBAY	SENEGAL
14,73	-16,50	27	DAKAR / YOFF	SENEGAL
12,57	-11,78	178	KEDOUGOU	SENEGAL
15,38	-14,88	20	LINGUERE	SENEGAL
15,62	-15,78	38	LOUGA	SENEGAL
15,65	-12,75	15	MATAM	SENEGAL
13,73	-14,22	18	NIORO DU RIP	SENEGAL
16,65	-13,03	6	PODOR	SENEGAL
13,77	-12,32	49	TAMBACOUNDA	SENEGAL
12,55	-15,73	26	ZIGUINCHOR	SENEGAL
48,17	17,12	292	BRATISLAVA	SLOVAQUIE
49,12	20,08	1353	STRBSKE PLESO	SLOVAQUIE
48,67	21,73	107	TREBISOV	SLOVAQUIE
46,07	14,52	299	LJUBLJANA /	SLOVENIE
12,73	34,13	445	ABU NA'AMA	SOUDAN
19,17	30,48	226	DONGOLA	SOUDAN
4,87	31,60	460	JUBA	SOUDAN
15,67	32,53	380	SHAMBAT OBS.	SOUDAN
14,40	33,48	408	WAD MEDANI	SOUDAN
60,43	15,50	153	BORLANGE	SUEDE
57,70	12,00	5	GOTEBORG	SUEDE
59,35	18,07	30	STOCKHOLM	SUEDE
47,55	7,58	316	BASEL	SUISSE
46,80	9,82	1592	DAVOS	SUISSE
46,25	6,13	420	GENEVE	SUISSE
47,08	6,80	1018	LA CHAUX DE FONDS	SUISSE
46,17	8,78	366	LOCARNO - MONTI	SUISSE
46,82	6,95	490	PAYERNE	SUISSE
47,25	9,35	2490	SAENTIS	SUISSE
47,48	8,53	436	ZUERICH / KLOTE	SUISSE
39,95	32,88	891	ANKARA	TURQUIE
36,87	30,73	50	ANTALYA	TURQUIE

Latitude	Longitude	Altitude (m)	Ville	Pays
37,88	40,18	686	DIYARBAKIR	TURQUIE
40,97	29,08	33	ISTANBUL / GOZTEPE	TURQUIE
41,28	36,33	4	SAMSUN	TURQUIE
50,40	30,45	179	KIEV	UKRAINE
46,48	30,63	64	ODESSA	UKRAINE
44,80	20,47	132	BEOGRAD	YOUgoslavie
2,78	24,78	450	BUTA	ZAIRE
-4,12	22,42	654	KANANGA	ZAIRE
-3,63	15,25	445	KINSHASA / BINZ	ZAIRE
0,05	18,27	345	MBANDAKA	ZAIRE
-9,78	31,13	1384	KASAMA	ZAMBIE
-14,58	28,32	1280	LUSAKA CITY ARP	ZAMBIE
-10,90	28,85	1259	MANSA	ZAMBIE
-12,73	31,93	568	MFUWE	ZAMBIE
-13,00	28,65	1269	NDOLA	ZAMBIE
-19,85	28,62	1343	BULAWAYO	ZIMBABWE
-16,17	31,02	1471	HARARE	ZIMBABWE

IV.3 Résultats

Nous avons tout d'abord calculé la différence entre les séries temporelles des mesures *in-situ* pour chaque jour de la période 1985-1990 et les séries temporelles d'HelioClim-1 coïncidentes. Nous en déduisons une série temporelle de différences (l'irradiation mesurée moins l'irradiation estimée) pour chacune des stations. A partir de cette matrice de différences, nous calculons :

- l'écart quadratique moyen (EQM) ainsi que sa valeur relative,
- le biais et sa valeur relative,
- le coefficient de corrélation,

et traçons des histogrammes et corrélogrammes. Nous pouvons combiner ces matrices pour obtenir ces quantités pour l'ensemble des stations ainsi que pour des sous-ensembles définis par exemple, par classe de latitude ou autres paramètres.

Avant de présenter nos résultats, nous rappelons dans le tableau IV.2 les résultats de la validation de la méthode Heliosat II par Rigollier *et al.* (2004). Cette validation a été effectuée dans des conditions différentes. Il s'agit d'une comparaison entre l'irradiation globale journalière estimée par la méthode Heliosat II appliquée à des images Meteosat de haute résolution spatiale et temporelle. Trente-cinq stations en Europe occidentale ont été sélectionnées dans les conditions relativement favorables pour minimiser les différences entre les estimations satellitales et les mesures *in-situ* (conditions climatiques tempérées et homogènes, pas de zones montagneuses). Ces résultats nous servent de référence pour la validation d'HelioClim-1, laquelle devrait présenter des valeurs relativement proches. Cependant, les estimations fournies par HelioClim-1 sont construites à partir d'un petit nombre d'images tri-horaires, sur lesquelles s'appliquent de plus une interpolation spatiale. Des différences plus grandes que celles obtenues par Rigollier *et al.* sont donc attendues.

Tableau IV.2 : Statistiques des différences entre l'irradiation globale journalière mesurée *in-situ* celle estimée par la méthode Heliosat II, d'après Rigollier *et al.* (2004)

Période	Valeur moyenne au sol (Wh/m ²)	Biais (Wh/m ²)	EQM (Wh/m ²)	Coefficient de corrélation	Nombre de mesures
janvier 95	987	-54 (-5%)	199 (20%)	0,95	344
avril 95	3366	175 (5%)	534 (16%)	0,95	1044
juillet 94	5817	143 (2%)	566 (10%)	0,94	887

IV.3.1 Résultats globaux

Le tableau IV.3 présente les résultats de nos comparaisons pour l'ensemble des stations.

Tableau IV.3 : Statistiques des différences entre l'irradiation globale journalière mesurée *in-situ* et celle fournie par HelioClim-1

Période	Valeur moyenne (Wh/m ²)	Biais (Wh/m ²)	EQM (Wh/m ²)	Coefficient de corrélation	Nombre de mesures
Tous les jours de 1985 à 1990	4030	-128 (-3%)	699 (17%)	0,90	179967

Nous remarquons qu'HelioClim-1 fournit de bons résultats par rapport à ceux présentés par Rigollier *et al.* (2004). Le biais est faible et négatif. Nous avons donc en moyenne une légère sur-estimation de l'irradiation par HelioClim-1 sur l'ensemble des sites testés. L'écart quadratique moyen est satisfaisant et similaire à celui trouvé par Rigollier *et al.* (2004). Le coefficient de corrélation, quoique légèrement plus faible que dans le tableau IV.2, reste élevé.

La figure IV.2 présente les estimations d'HelioClim-1 en fonction des données mesurées au sol pour l'ensemble des stations et toute la période 1985-1990. Nous pouvons observer une corrélation linéaire entre les estimations et les données *in-situ*. Nous observons une asymétrie, par rapport à la droite d'équation $y=x$, en cohérence avec le signe négatif du biais. L'asymétrie est plus prononcée lorsque les mesures *in-situ* sont comprises approximativement entre 3000 et 5000 Wh/m² c'est-à-dire autour de la moyenne de l'irradiation mesurée au sol (4030 Wh/m²). Nous observons enfin que quelque soit la valeur mesurée au sol, il existe un minimum pour les estimations d'HelioClim-1. Ceci s'explique par le fait que pour les cas de ciel complètement couvert (indice d'ennuagement supérieur à 1,1), la relation entre l'indice d'ennuagement n et l'indice ciel clair K_c est une fonction constante (cf. paragraphe III.1).

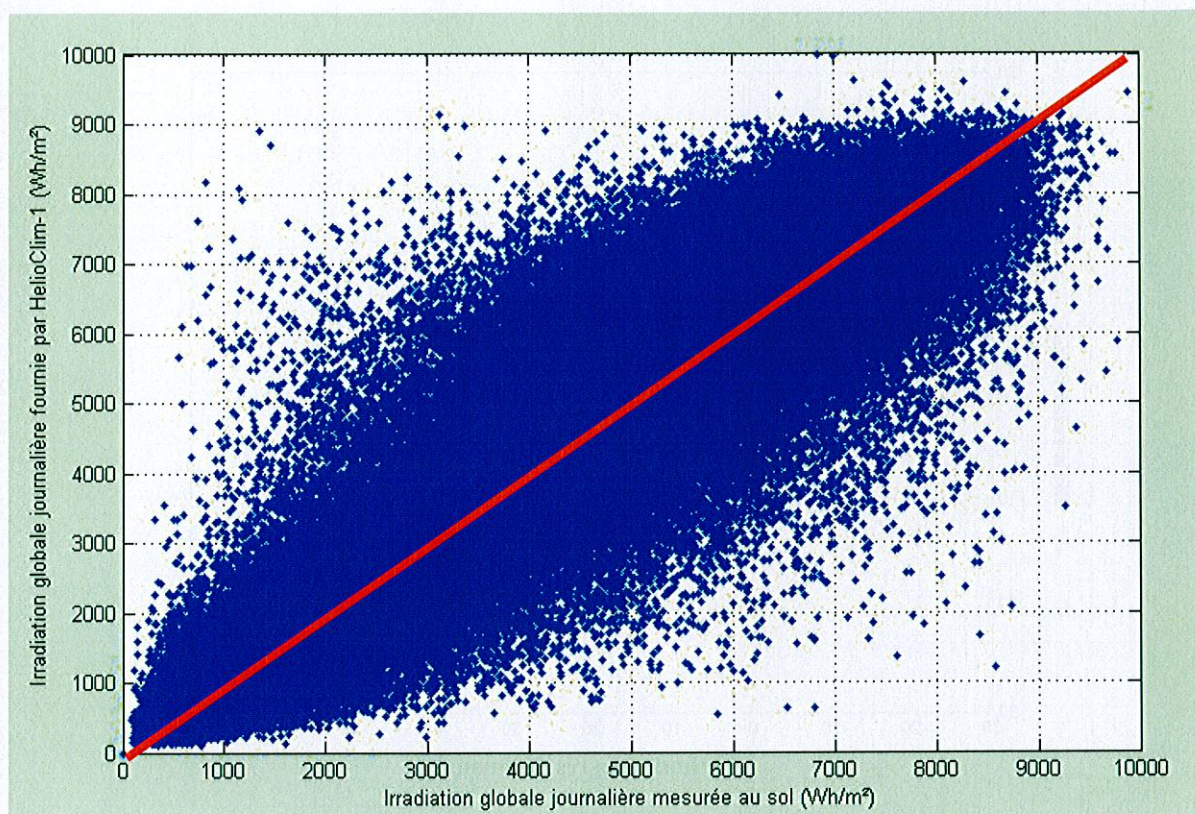


Figure IV.2 : Corrélogramme des valeurs d'irradiation globale mesurées *in-situ* et celles fournies par HelioClim-1.

Dans les paragraphes suivants, nous présentons ces grandeurs statistiques en fonction des paramètres spatio-temporels susceptibles d'influencer la différence entre les mesures *in-situ* et les estimations de l'irradiation.

IV.3.2 Influence de la latitude

La latitude est un paramètre susceptible d'influencer l'incertitude des estimations d'HelioClim-1. En effet, l'interpolation spatiale des éclairagements des neuf plus proches pixels d'un point donné dépend de la latitude. De plus, ce paramètre géographique contribue à définir les conditions climatiques d'un lieu donné par l'élévation du soleil à midi pour une saison donnée. Les conditions climatiques locales, rappelons-le, influencent la différence entre l'irradiation mesurée au sol et celle estimée par satellite.

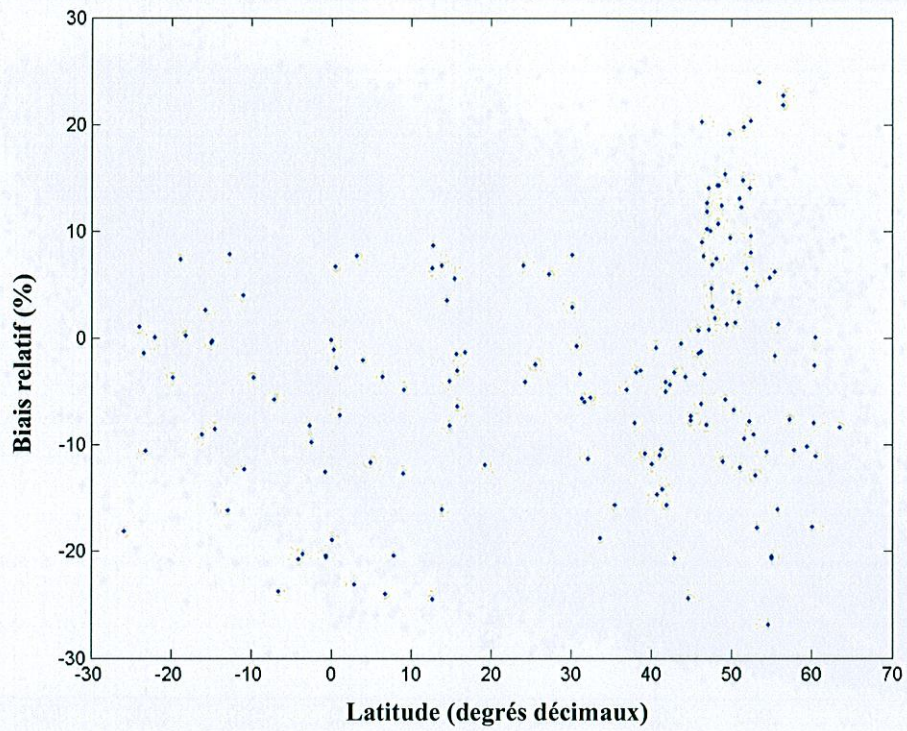


Figure IV.3 : Biais relatif en fonction de la latitude

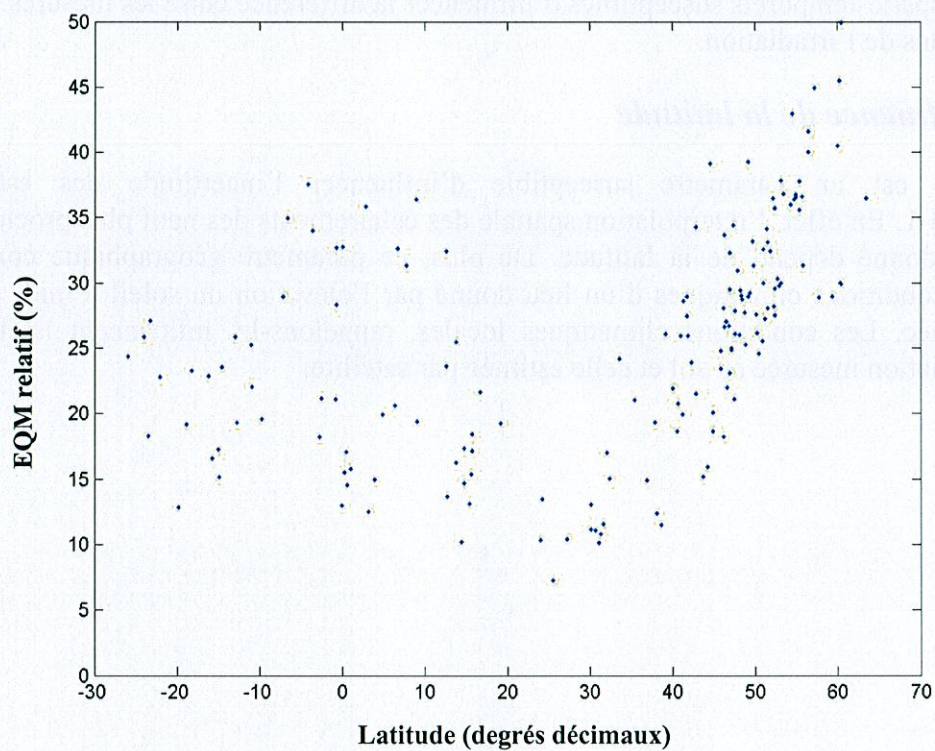


Figure IV.4 : Ecart quadratique moyen relatif en fonction de la latitude

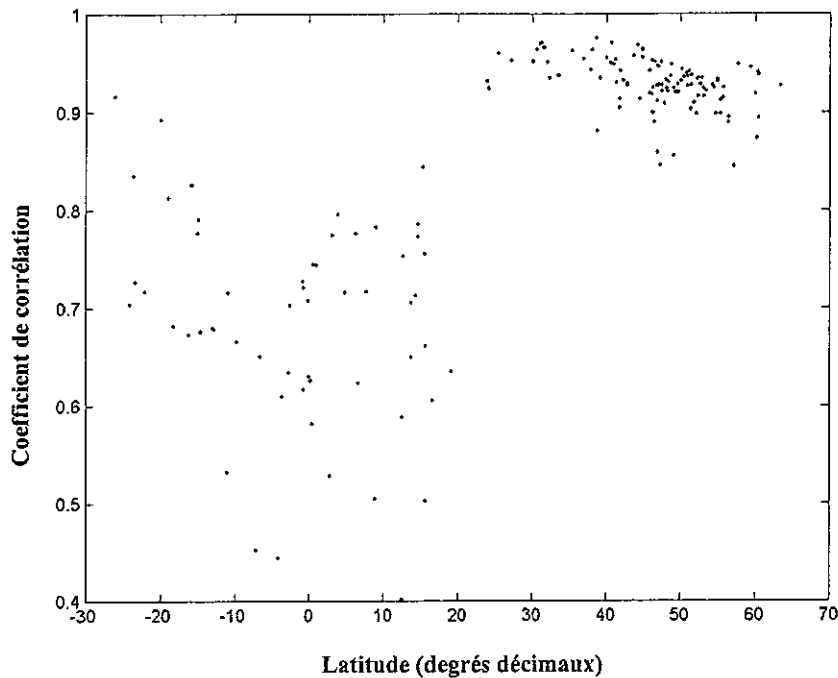


Figure IV.5 : coefficient de corrélation en fonction de latitude

Les figures IV.3, IV.4 et IV.5 représentent respectivement le biais relatif, l'EQM relatif et le coefficient de corrélation pour chacune des stations en fonction de la latitude. Pour chacune des trois figures, nous observons une plus forte concentration de points pour les latitudes supérieures à 35 degrés décimaux, ce qui correspond à la plus forte densité de stations en Europe par rapport au reste de la zone d'étude pour ces comparaisons.

Parmi ces trois graphes nous n'observons aucune relation particulière entre ces grandeurs statistiques et la latitude. On peut noter que le coefficient de corrélation est nettement plus élevée pour les stations de latitude plus élevées que 30°N ; ceci ne se traduit pas par un biais ou un EQM plus faible. Notre analyse n'a pas mis en évidence une relation entre les incertitudes des estimations d'HelioClim-1 et la latitude.

IV.3.3 Influence de la longitude

La longitude peut influencer l'erreur des estimations d'HelioClim-1. Ces estimations proviennent de données satellitales dont l'échantillonnage temporel est de 3 heures. Cet échantillonnage s'effectue à heures fixes, déterminées en temps universel, et non pas en temps solaire moyen ou temps solaire vrai (TSV). Il s'ensuit que le calcul de l'irradiation journalière s'effectue avec des instants TSV différents selon la longitude.

Les figures IV.6, IV.7 et IV.8 représentent respectivement le biais relatif, l'EQM relatif et le coefficient de corrélation pour chacune des stations en fonction de la longitude. Parmi ces trois graphes nous n'observons aucune corrélation entre ces grandeurs statistiques et la longitude. Nous ne pouvons pas mettre en évidence une relation entre les incertitudes des estimations d'HelioClim-1 et la longitude.

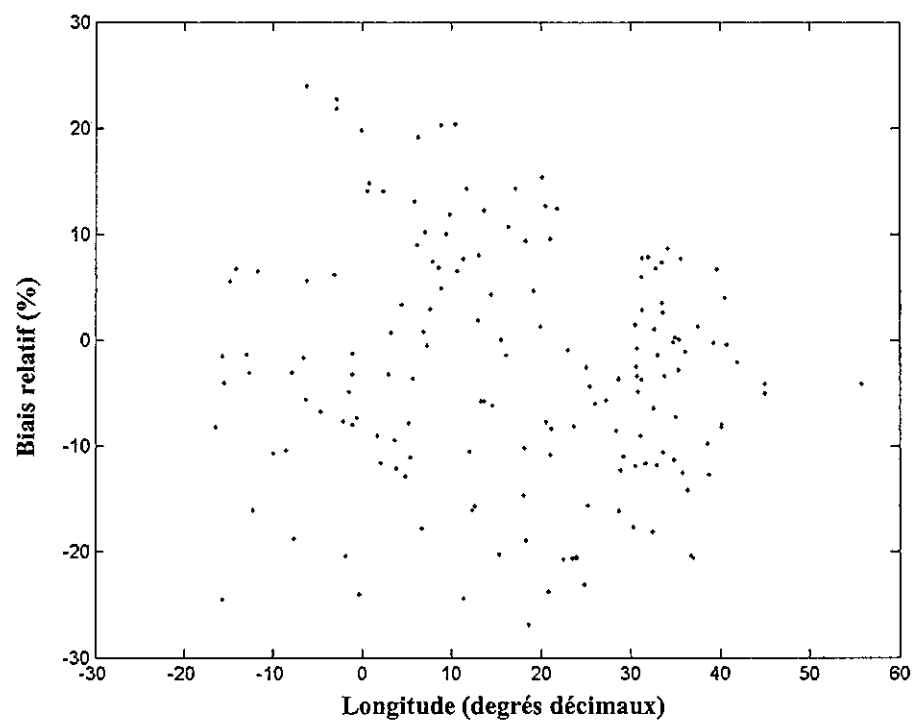


Figure IV.6 : Biais relatif en fonction de la longitude

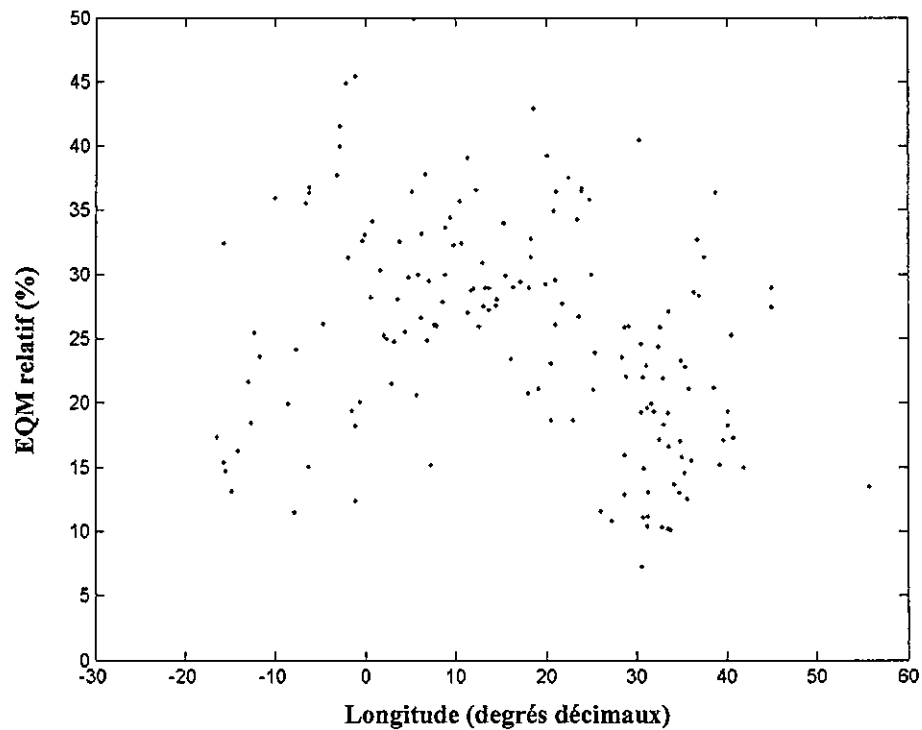


Figure IV.7 : écart quadratique moyen en fonction de la longitude

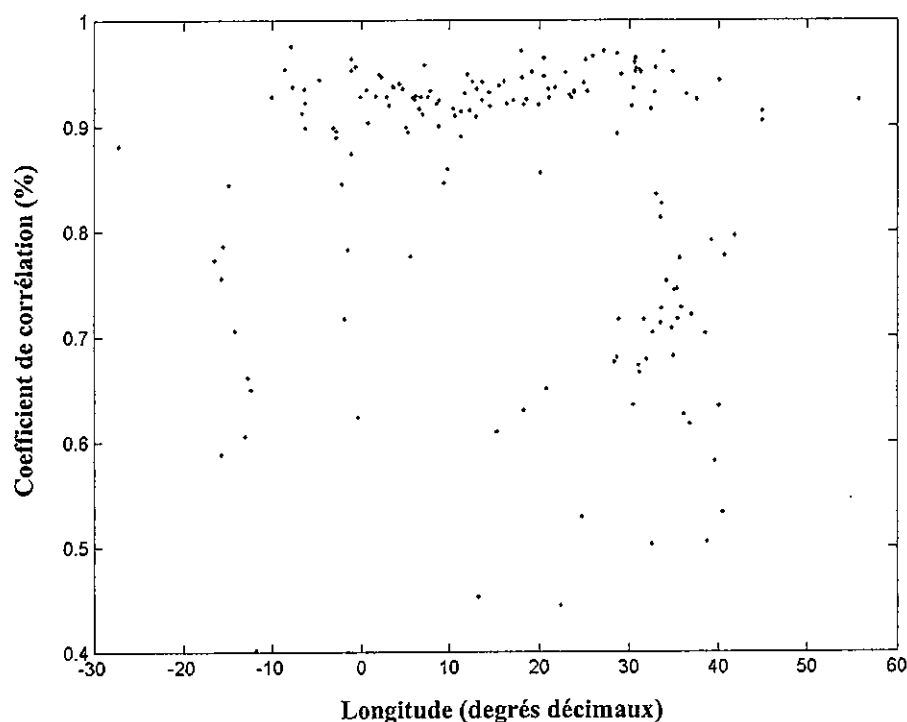


Figure IV.8 : coefficient de corrélation en fonction de la longitude.

IV.3.4 Influence de l'élévation du terrain

L'élévation du terrain, comme la latitude, est aussi une caractéristique des conditions climatiques locales. De plus, l'interpolation spatiale utilisée par HelioClim-1 prend en compte ce paramètre. Nous avons donc analysé l'influence de l'élévation de terrain sur les incertitudes des estimations.

Les figures IV.9, IV.10 et IV.11 représentent respectivement le biais relatif, l'EQM relatif et le coefficient de corrélation pour chacune des stations en fonction de l'élévation du terrain. Nous observons évidemment que la majorité des stations se situe au-dessous de 500 m d'altitude. Nous remarquons cependant que les estimations sur des points situés en haute altitude ne présentent pas d'incertitudes plus élevées que la majorité des stations situées près du niveau de la mer. Nous n'observons donc aucune corrélation entre les incertitudes des estimations et l'élévation du terrain.

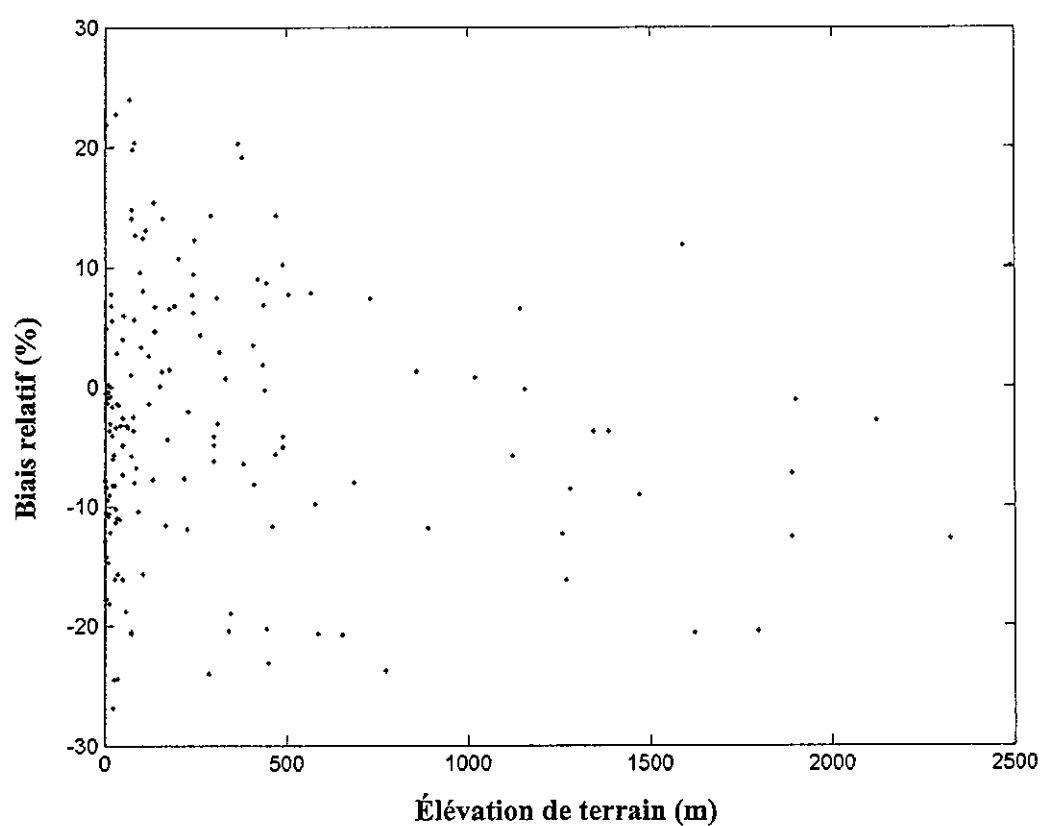


Figure IV.9 : Biais relatif en fonction de l'élévation de terrain

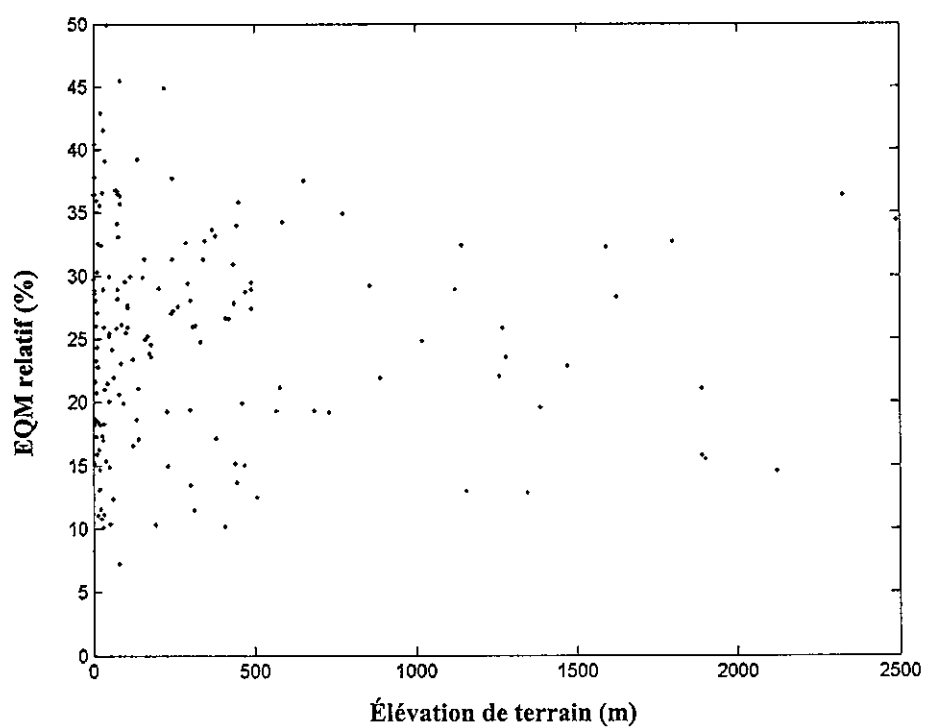


Figure 10 : écart quadratique moyen en fonction de l'élévation de terrain

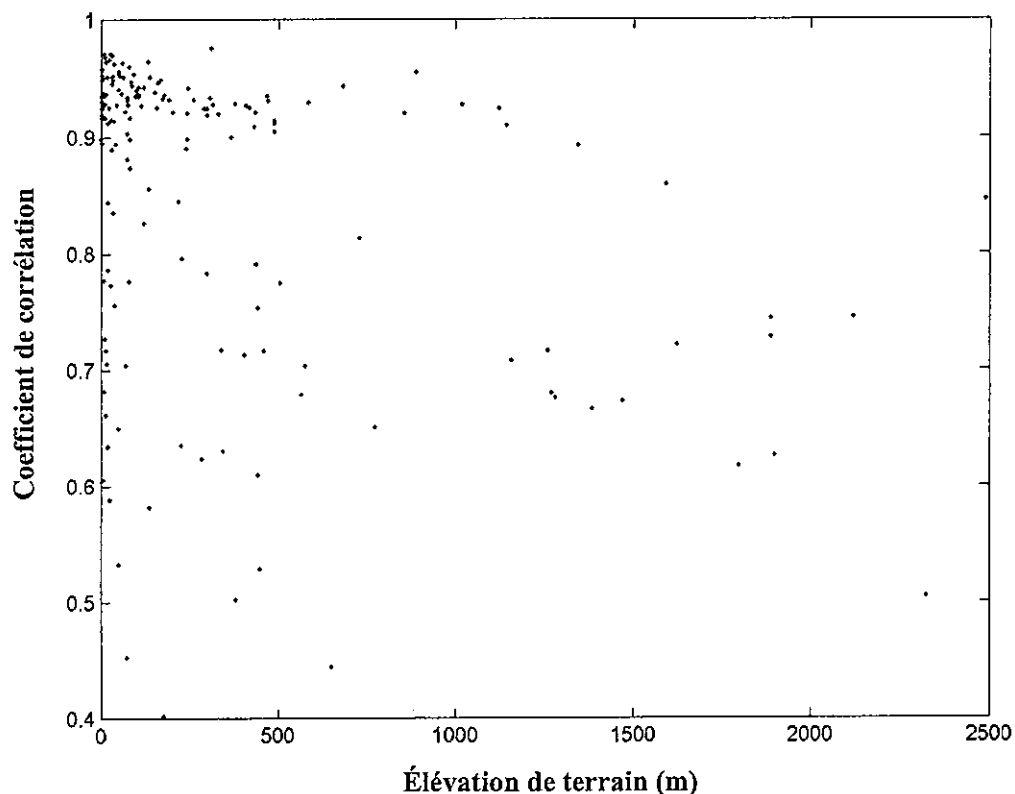


Figure IV.11 : coefficient de corrélation en fonction de l'élévation de terrain

IV.3.5 Influence de la fiabilité

Un indice de fiabilité est délivré avec les estimations d'HelioClim-1. Il représente le nombre d'images satellitales disponibles en une journée qui ont été utilisées pour calculer une irradiation journalière en un point. Ce nombre est compris entre 3 et 5, les irradiations estimées à partir de moins de trois images ne sont pas délivrées par HelioClim-1.

Nous avons calculé les grandeurs statistiques pour chacun de ces trois cas. Les résultats sont présentés dans les tableaux IV.4, IV.5 et IV.6. Nous pouvons tout d'abord constater que les meilleurs résultats sont donnés par les estimations issues de 4 images (tableau IV.5). L'EQM relatif est plus faible que celui obtenu pour les résultats globaux (cf. tableau IV.3), le biais est identique, le coefficient de corrélation est toutefois plus faible. Nous attendions de meilleurs résultats pour un indice de 5 puisqu'il s'agit du cas où l'échantillonnage temporel de l'information satellitale est le plus précis. Même si l'EQM relatif est le même que celui des résultats globaux, ce cas présente un EQM et un biais relatif plus élevés que lorsque l'indice de fiabilité est de 4. Cependant, les estimations d'HelioClim-1 présentant un indice égal à 5 sont très minoritaires par rapport aux autres. Les résultats dans ce cas ne constituent pas une bonne représentativité statistique.

Tableau IV.4 : Statistiques des différences pour les estimations journalières issues de 3 images B2.

Période	Valeur moyenne (Wh/m ²)	Biais (Wh/m ²)	EQM (Wh/m ²)	Coefficient de corrélation	Nombre de mesures
Tous les jours de 1985 à 1990	4042	-146 (-4 %)	694(17%)	0,88	82846

Tableau IV.5 : Statistiques des différences pour les estimations journalières issues de 4 images B2.

Période	Valeur moyenne (Wh/m ²)	Biais (Wh/m ²)	EQM (Wh/m ²)	Coefficient de corrélation	Nombre de mesures
Tous les jours de 1985 à 1990	5721	-155 (-3%)	805 (14%)	0,82	92375

Tableau IV.6 : Statistiques des différences pour les estimations journalières issues de 5 images B2.

Période	Valeur moyenne (Wh/m ²)	Biais (Wh/m ²)	EQM (Wh/m ²)	Coefficient de corrélation	Nombre de mesures
Tous les jours de 1985 à 1990	5074	183 (4%)	896(17%)	0,85	4746

IV.3.6 Influence de la variabilité temporelle

La variabilité temporelle du rayonnement est un indicateur de la stabilité temporelle de l'état optique de l'atmosphère d'un lieu donnée. Elle représente donc une caractéristique des conditions climatiques locales.

Nous avons analysé l'influence de la variabilité temporelle du rayonnement sur l'erreur des estimations d'HelioClim-1. Cette variabilité est la moyenne quadratique d'une série de trois valeurs de l'irradiation journalière en un point donné : celle du jour donné, celle de la veille et celle du lendemain. Cette moyenne a été calculée avec des valeurs d'irradiation mesurée au sol.

La figure IV.11 représente la variabilité temporelle en fonction de l'erreur entre les mesures *in-situ* et les estimations d'HelioClim-1. Nous observons nettement que l'erreur croît en valeur absolue avec la variabilité temporelle. La symétrie du nuage de point autour de l'axe $x=0$ est très prononcée.

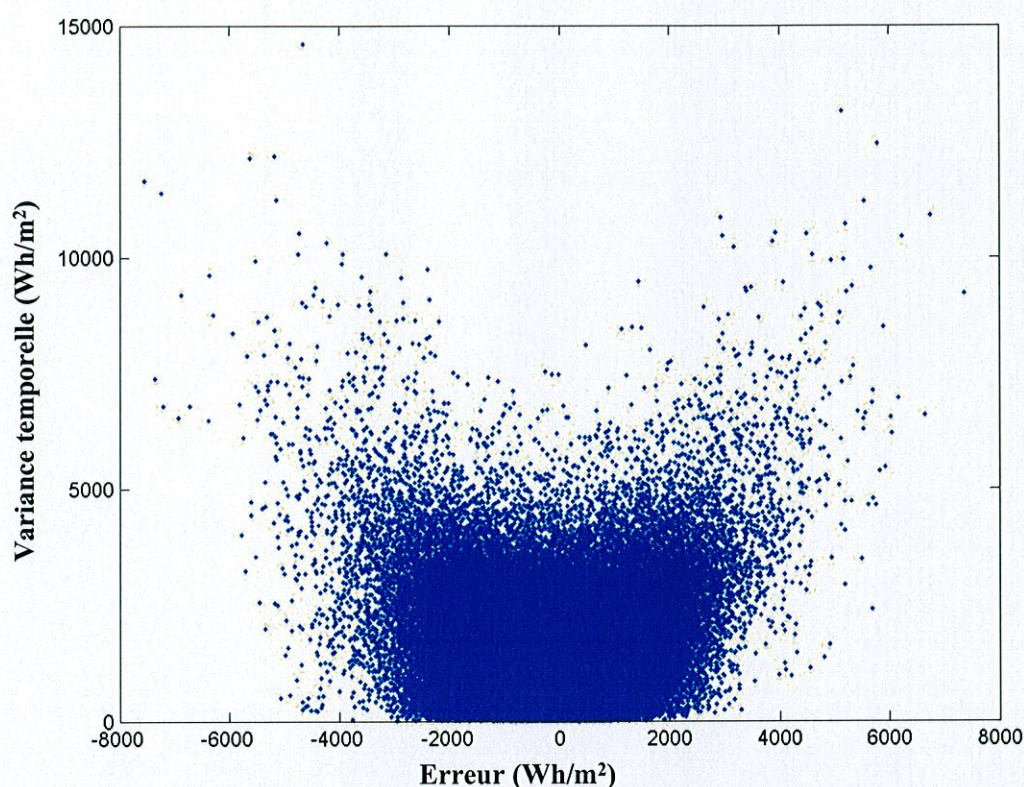


Figure IV.12 : Différence en fonction de la variance temporelle

Nous avons donc mis en évidence une corrélation entre la variabilité temporelle et les erreurs d'estimation d'HelioClim-1. Cependant, on notera que premièrement, une grosse partie des points du graphe (erreur comprise entre -2000 et 2000 Wh/m^2) est indifférenciée par rapport à la variabilité temporelle, c'est-à-dire que pour une variabilité temporelle comprise entre 0 et 5000 Wh/m^2 (l'erreur peut varier de -2000 à $+2000 \text{ Wh/m}^2$). Deuxièmement, on observe que pour une même variabilité temporelle, l'erreur est positive ou négative sans que son signe puisse être prédit. Ceci exclut la possibilité de modéliser l'erreur et de corriger *a posteriori* l'irradiation fournie par HelioClim-1.

Chapitre V

Introduction de MSG dans les activités opérationnelles d'estimation du rayonnement solaire

V.1 Introduction – présentation de MSG

La mise en service de *Meteosat Second Generation* (MSG) ouvre la possibilité d'apporter à l'utilisateur une information sur le rayonnement solaire de meilleure qualité. En effet, le radiomètre embarqué SEVIRI (*Spinning Enhanced for Visible and Infrared Imager*) permet l'acquisition d'images d'une résolution spatiale et temporelle plus élevée que celle disponible par la série actuelle de Meteosat (tableau V.1). Comme les cartes de rayonnement solaire au sol sont d'autant plus précises que la résolution spatiale de l'image satellite est plus fine (Zelenka 1994), l'estimation du rayonnement peut être améliorée. De plus, SEVIRI possède 12 canaux d'acquisition dans une bande spectrale située entre 0.6 et 12 μm . Ceci apporte à l'estimation du rayonnement le bénéfice d'une modélisation plus fine de l'atmosphère par une caractérisation plus précise des nuages, de l'ozone et de la vapeur d'eau (Mueller *et al.* 2004).

Paramètres	Meteosat	MSG
Résolution spatiale (nadir)	2.5 km	1 km (large bande) 3 km (bandes étroites)
Résolution temporelle	30 minutes	15 minutes
Nombre de canaux du radiomètre	3 (1 VIS, 2 IR)	11 (2 VIS, 9 IR) plus une large bande

Tableau V.1: Comparaison des caractéristiques générales de MSG par rapport au système Meteosat (VIS : visible, IR : infrarouge).

Notre préparation de l'introduction de cet outil dans les activités opérationnelles d'estimation et de diffusion des paramètres du rayonnement solaire s'est concrétisée d'une part par notre participation au développement d'une nouvelle méthode opérationnelle d'estimation du rayonnement plus complexe et plus ambitieuse. Le développement de cette méthode, appelée Heliosat III, s'effectue dans le cadre d'un projet européen. Elle utilise en entrée des données de MSG et du satellite Envisat. Elle a pour objectif de pouvoir fournir en temps réel des cartes d'irradiation de même résolution spatiale que celle de MSG (3 km) comprenant les composantes directe et diffuse ainsi que sa distribution spectrale sur toute la bande visible. D'autre part, profitant de notre expérience acquise durant la création d'HelioClim-1, notre préparation inclut les spécifications d'un système d'information intégré, HelioClim-3, contenant les résultats d'Heliosat III afin de les diffuser par le web.

Nous présentons dans ce chapitre la méthode Heliosat III, actuellement en cours de développement. Cette présentation inclut notre modeste contribution à cette méthode. Nous discutons ensuite nos spécifications du futur système d'information intégré HelioClim-3, destiné à stocker et diffuser les résultats de cette méthode.

Cependant, ce chapitre débute par la présentation du système HelioClim-2 et relate notre contribution à ce système intermédiaire destiné à assurer une continuité de l'exploitation des données au cours des transitions engendrées par l'évolution des outils (Meteosat-7 à MSG) et des méthodes (Heliosat II à Heliosat III).

V.2 Le système HelioClim-2

La mise en service d'HelioClim-3 n'aura lieu que lorsque la méthode Heliosat III et la chaîne de traitement seront entièrement opérationnelles, sans doute pas avant la fin de 2004. Cependant, le programme Meteosat-7 prend fin en 2005. Afin d'assurer une continuité dans l'exploitation des données par les usagers entre HelioClim-1 et HelioClim-3, il a paru approprié au centre d'énergétique d'élaborer un système d'information intermédiaire HelioClim-2, d'autant plus qu'il sera peut-être difficile de trouver les ressources informatiques nécessaires pour traiter *a posteriori* les images MSG de 2004 à l'aide de Heliosat III.

Chaque système HelioClim devrait avoir un recouvrement d'environ deux ans avec son « prédécesseur » ou son « successeur » (figure V.1). Le fonctionnement simultané de deux systèmes d'information, permet à HelioClim-1 de servir de référence pour HelioClim-2, c'est-à-dire permettre aux usagers de se familiariser avec cette nouvelle climatologie par référence à ce qu'ils connaissent. Le recouvrement peut éventuellement permettre d'améliorer la climatologie HelioClim-1 par comparaison avec une climatologie HelioClim-2 de meilleure qualité. De même, pour HelioClim-2 vis-à-vis de HelioClim-3.

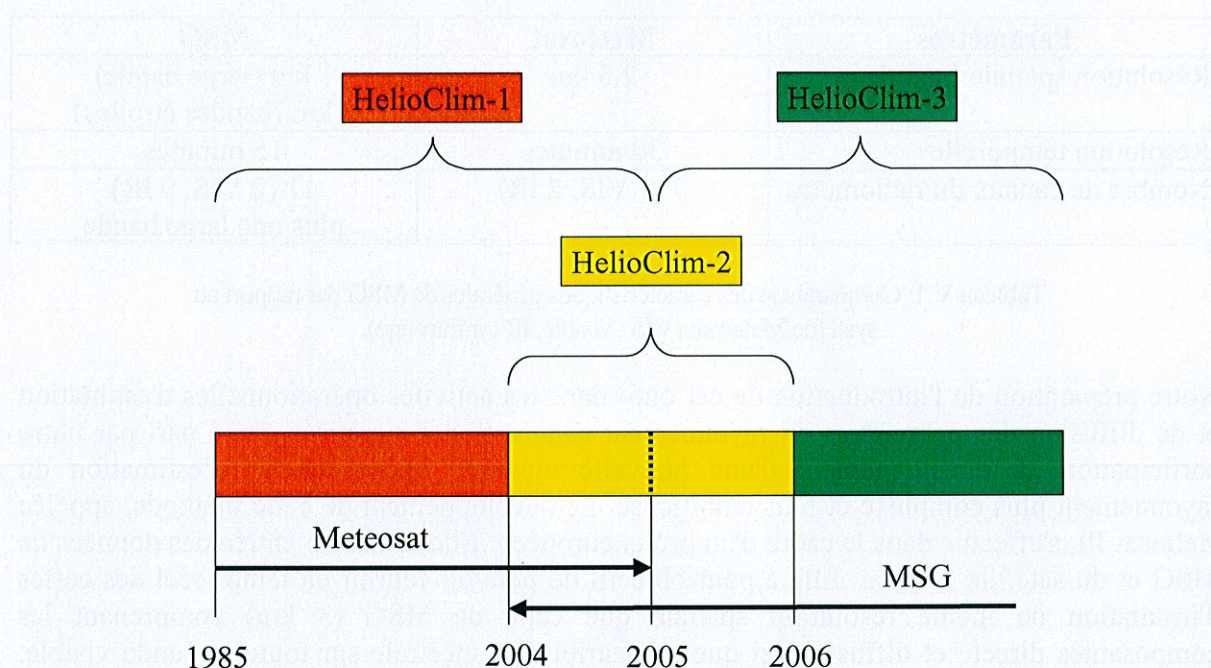


Figure V.1 : Chronologie des systèmes HelioClim

HelioClim-1 devrait ainsi couvrir jusqu'à 2005, HelioClim-2 de 2004 à 2006 et HelioClim-3 à partir de 2005.

HelioClim-2 délivre les résultats de l'application de la méthode Heliosat II à des images MSG. Cette méthode a été établie pour des images acquises dans une large bande spectrale, $0,4 \mu\text{m} - 1,1 \mu\text{m}$ approximativement. Son bon fonctionnement pour des bandes spectrales plus étroites, comme les deux bandes dans le visible de MSG, n'a pas été démontré. Le mouvement naturel est donc de l'appliquer aux images acquises par le capteur HRV (*High-Resolution Visible radiometer*) de MSG à bande large. Cependant, les informations

disponibles dans ce canal à bande large ne couvrent pas l'ensemble de son champ de vue pour des raisons de bande passante. Eumetsat a décidé de ne fournir que des images restreintes à l'Europe et une partie de l'Afrique (figure V.2).



Figure V.2 : Image fournie par le canal visible haute-résolution

Cette figure montre une "géographie" assez curieuse et il apparaît clairement que ce genre d'image ne convient pas à nos objectifs. S'il est possible de recaler géographiquement les deux parties, on notera qu'une partie de l'Afrique de l'Ouest est manquante, de même que l'Océan Atlantique tropical et Sud. On remarquera également que la césure entre les deux parts entraîne une omission des observations.

Cependant, MSG possède deux autres canaux visibles mais en bandes plus étroites centrées sur $0,6 \mu\text{m}$ et $0,8 \mu\text{m}$. Afin de pouvoir fournir les informations du rayonnement solaire sur l'ensemble du champ de vue en utilisant des images acquises sur une bande visible de largeur équivalente à celle de Meteosat-7, nous avons élaboré une méthode simulant de telles images à partir des deux canaux à bandes étroites. Cette démarche est notre contribution à HelioClim-2. Elle fait l'objet de l'article joint en annexe II. Nous en rappelons les grandes lignes ici.

Plusieurs travaux ont proposé des méthodes de conversion des luminances observées dans des bandes étroites en luminances observées dans une bande large. Ces modèles dépendent généralement de l'angle zénithal solaire, de celui d'observation, de l'albédo du sol, voire d'autres paramètres en optique atmosphérique. Notre contrainte principale qui est le temps de calcul, nous a incité à aller au plus simple et à rechercher un modèle linéaire dont les entrées seraient les luminances des canaux étroits et dont les paramètres auraient été estimés une fois pour toutes par comparaison entre des images MSG et Meteosat-7. L'outil utilisé est une régression multi-paramètres. Une fois le modèle établi pour des images d'octobre et novembre 2003, nous l'avons testé à l'aide de jeux de données indépendants, de décembre 2003 à mars 2004.

Le résultat a été jugé satisfaisant. Cette méthode permet d'inférer des images MSG à bande large, qui sont similaires à ce qu'observerait le satellite Meteosat-7 dans les mêmes conditions (figure V.3). La méthode Heliosat II est donc applicable et ses résultats devraient être similaires à ceux obtenus pour le satellite Meteosat-7.

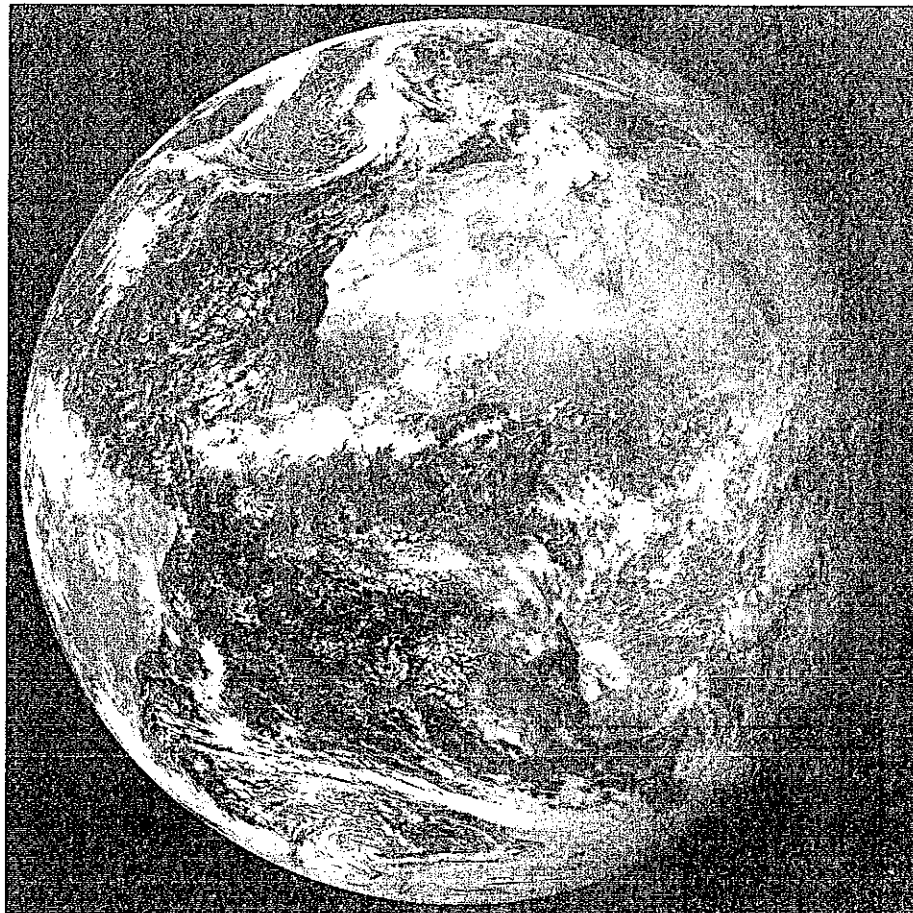


Figure V.3 : Image MSG à bande large inférée à partir des deux canaux étroits.

L'erreur dans la simulation des luminances est faible : le biais relatif est très faible (0.24 %), et l'écart quadratique moyen relatif est de 6 % (figure V.4). Selon Rigollier *et al.* (2002), l'erreur relative sur l'étalonnage des comptes numériques de Meteosat-7 est de 13 %. Si on y ajoute l'erreur de simulation des luminances (somme quadratique), on obtient une erreur relative associée aux luminances de 15 %. Nous estimons que ce résultat est d'une qualité suffisante, en prenant en compte d'autres critères comme la vitesse d'exécution et la simplicité opérationnelle puisqu'aucune information extérieure à MSG n'est requise.

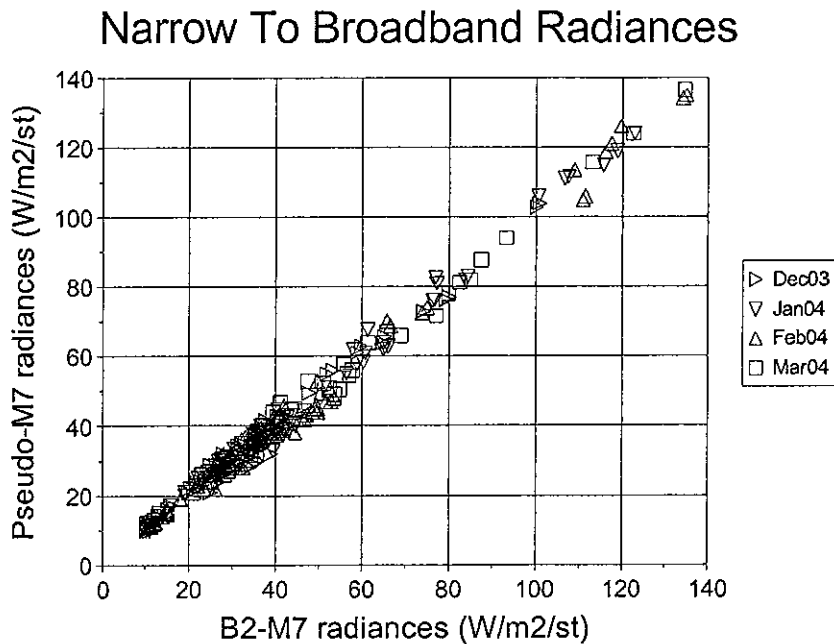


Figure V.4 : Comparaison entre les luminances observées par Meteosat-7 (axe horizontal) et celles inférées par notre méthode (axe vertical), pour quatre mois.

Nous n'avons pas vraiment participé à la définition du système d'information HelioClim-2, qui fût décidé à l'automne 2003, soit un peu trop tard vis-à-vis des échéances de notre thèse. Il reprend quelques-uns des grands principes de HelioClim-1, et notamment, une structure basée sur des cellules géographiques permettant de retrouver rapidement des séries temporelles, ainsi qu'un serveur web associé à la base de données permettant l'interface avec le service SoDa. Cependant, il existe des différences importantes entre les deux systèmes en ce qui concerne le type d'information fournie, qui expliquent les différences d'architecture. HelioClim-2 délivre des irradiances horaires, ainsi que les quantités intégrées temporellement. Cela entraîne donc une augmentation significative du volume de données et un délai de recouvrement de l'information plus long : le volume annuel pour HelioClim-1 est d'environ 0,7 Go tandis qu'il serait de 16 Go pour HelioClim-2. Il a donc été décidé de stocker, non plus les indices d'enneuagement, mais les éclaircissements. On a également choisi une granularité d'un mois pour la base de données. La méthode Heliosat II est par conséquent appliquée de bout en bout. Pour gagner du temps lors de la réponse à la requête, une projection géographique est effectuée initialement pour passer de la géométrie du satellite MSG à une projection canonique (latitude, longitude) avec une cellule de taille constante, de 5' d'arc. Les données sont archivées en temps solaire vrai et non plus en temps universel coordonné. Enfin, pour gagner de l'espace de stockage, la place nécessaire pour stocker une série journalière est calculée pour chaque mois et chaque cellule géographique en fonction des heures de lever et coucher du soleil. Cette gestion un peu complexe a permis un gain d'environ 33 % par rapport à des enregistrements de longueur fixe.

V.3 Présentation de la méthode Heliosat III

La méthode se divise en trois modules. Le premier, appelé SOLIS *ciel-clair*, fournit l'irradiation globale, directe, diffuse et leurs distributions spectrales respectives dans les conditions d'un ciel sans nuage. Ce module est déjà développé. Le deuxième module, actuellement en cours de développement, calcule les mêmes paramètres, mais pour un ciel totalement couvert, les paramètres optiques des nuages étant déduits du traitement des images du MSG. Le troisième module sera une combinaison des résultats des deux autres et traitera le ciel partiellement couvert. Les entrées et sorties de l'ensemble de la méthode sont cependant déjà connues ainsi que les contraintes opérationnelles qui en dérivent.

Comme cela a déjà été mentionné, cette méthode est développée par un consortium européen, chacune des équipes testant des solutions, qui, si elles sont fructueuses, sont intégrées dans la méthode.

V.3.1 SOLIS *ciel clair*

Afin de bénéficier des capacités de MSG pour l'estimation du rayonnement par ciel clair, le consortium a décidé d'améliorer le modèle ciel clair de la méthode Heliosat II en utilisant le modèle numérique de transfert radiatif connu LibRadtran (2002). SOLIS *ciel clair* utilise ce modèle avec comme principales variables des paramètres atmosphériques estimés en temps réel au moyen d'autres satellites, notamment Envisat. Il s'agit de la concentration en ozone, en vapeur d'eau ainsi que les propriétés des aérosols. Les autres entrées sont issues de données modélisées ou climatologiques.

L'utilisation d'un tel modèle numérique pour estimer le rayonnement en temps réel à partir de données satellitales présente un inconvénient de temps calcul. En effet, la résolution temporelle de MSG est de 15 min. Durant cette période, près de 10 millions de pixels doivent être traités afin de cartographier le rayonnement solaire quart-horaire. Les modèles numériques ne peuvent estimer l'irradiation aussi rapidement.

Ce qui constitue l'innovation de SOLIS *ciel clair* est le fait d'avoir trouvé un modèle analytique de la description de la variation du rayonnement journalier dépendant uniquement de l'angle zénithal solaire. SOLIS *ciel clair* estime de manière déterministe trois paramètres synthétiques a , b et c pour chaque jour et chaque longueur d'onde souhaitée du domaine visible. Ils sont calculés à partir de simulations sur deux angles zénithaux distincts, en utilisant les paramètres optiques d'entrée estimés pour la journée en cours et sur un support spatial d'environ $50 \times 50 \text{ km}^2$. A partir de ces paramètres, l'irradiation globale, directe et diffuse des différentes longueurs d'onde du visible peuvent être calculées pour n'importe quel moment de la journée sur chaque pixel suffisamment rapidement. L'article de Müller *et al.* (2004) ci-joint en annexe I présente les détails de ce nouveau modèle. Cette annexe montre également des comparaisons avec des mesures au sol et démontre la qualité de SOLIS *ciel clair*.

V.3.2 Le module « *ciel nuageux* »

Ce module, destiné à calculer l'irradiation par ciel nuageux ou totalement couvert, est encore en cours de développement. Actuellement, trois approches sont étudiées pour modéliser les effets optiques des nuages dans le cadre de l'estimation de l'irradiation. Les deux premières utilisent le principe de l'indice d'ennuagement ; les améliorations portent sur la relation entre

cet indice et l'indice de ciel clair en utilisant les paramètres optiques des nuages, obtenus par traitement des images de MSG à l'aide de la méthode Apollo (Kriebel et Gesell 1989 ; Saunders et Kriebel 1988) ou la méthode de Nakajima (Nakajima et King 1990). La troisième approche considère un modèle d'atmosphère contenant un unique nuage uniforme et horizontalement infini, avec une couche de ciel clair au-dessus et une autre entre le nuage et le sol. Il est prévu que ces trois approches soient comparées à l'automne 2004.

Pour notre part, nous ne participons pas à ce développement. Cependant, lors de notre séjour à Oldenburg, nous avons tenté une approche initiale utilisant l'indice d'ennuagement. Nous avons voulu tirer bénéfice des deux canaux de la bande visible MSG (0,6 et 0,8 μm) pour en dériver deux indices d'ennuagement spectraux au lieu d'un seul. L'objectif était de parvenir à une meilleure estimation de la composante diffuse de l'irradiation par une meilleure modélisation de la relation entre l'indice d'ennuagement et l'irradiation globale. On supposait en effet que la différence entre les deux indices aiderait à mieux représenter la transmission diffuse.

Le modèle numérique de transfert radiatif SBDART (Richiazzi *et al.* 1998) a été utilisé pour simuler le signal perçu par le satellite dans ces deux canaux spectraux pour différents états optiques de l'atmosphère nuageuse. Les différences entre les deux séries d'indices d'ennuagement ont été analysées. Plusieurs seuils de signification ont été définis en tenant compte de la sensibilité du radiomètre et l'erreur quadratique moyenne typique atteinte par les meilleures méthodes d'estimation de l'irradiation à partir de données satellitales. L'étude a démontré que la différence spectrale est trop petite pour espérer un bénéfice significatif à partir de cette approche utilisant des indices d'ennuagement spectraux.

V.3.3 Mode opératoire d'Heliosat III

Heliosat III débute par l'analyse d'une image de MSG par l'utilisation de la méthode Apollo. Apollo fournit pour chacun des pixels un paramètre indiquant trois possibilités.

- Le pixel est totalement dépourvu de nuages. Seul SOLIS ciel clair est utilisé. Il fournit pour chaque jour les paramètres a, b et c sur chacun des pixels d'environ 50*50 km². L'irradiation peut être déduite pour chaque moment de la journée en indiquant la valeur de l'angle zénithal solaire du moment donné.
- Le pixel est totalement couvert de nuages. Le module ciel-couvert est utilisé avec les propriétés des nuages (épaisseur optique, altitude du sommet de nuage, contenu en eau liquide, rayon moyen des gouttelettes contenues dans le nuage) déduites de MSG. L'irradiation est calculée pour chacun des pixels de MSG avec une relation liant l'irradiation par ciel clair déduite par SOLIS ciel-clair et les propriétés des nuages présents.
- Le pixel est partiellement couvert. Une combinaison de SOLIS ciel-clair et du module ciel couvert est appliquée afin de prendre en compte l'aspect hétérogène des nuages sur ce pixel.

V.4 Le système d'information intégré HelioClim-3

A l'aide de l'expérience acquise durant le développement et la mise en œuvre du système HelioClim-1, nous avons décidé d'exploiter les bénéfices apportés par MSG et la méthode Heliosat III en concevant un nouveau système d'information intégré appelé HelioClim-3. Ce

système a pour rôle de fournir les résultats de la méthode Heliosat III appliquée à des images MSG. Il est destiné à délivrer des informations du rayonnement solaire d'une qualité supérieure à celles fournies par le système HelioClim-1. En effet, outre la fine résolution spatiale mais également temporelle offerte par MSG, les composantes directe et diffuse de l'irradiation seront disponibles et ce pour différentes longueurs d'ondes du rayonnement visible. Une meilleure précision de l'information est également attendue. Enfin, déclaré en tant qu'application du système d'information coopératif SoDa, HelioClim-3 pourra fournir des paramètres avancés du rayonnement solaire au sol tels que l'irradiation sur plan incliné, la fraction photo-synthétiquement active ou l'illuminance. Ces résultats seront diffusés aux utilisateurs sur le web via SoDa.

La construction d'HelioClim-3 nécessite l'application opérationnelle de la méthode Heliosat III. Ce développement sera effectué dans le cadre d'une chaîne de traitement opérationnelle en temps quasi-réel de données satellitales localisée au DLR à Oberpfaffenhofen (Allemagne) et à l'école des mines de Paris à Sophia Antipolis. Nos contributions à HelioClim-3 concernent les spécifications générales de la chaîne de traitement des données satellitales et des éléments localisés à Sophia Antipolis, à savoir l'alimentation de la base de données d'HelioClim-3 ainsi que les spécifications du module de la requêtes utilisateur.

V.4.1 La chaîne de traitement opérationnelle

La figure V.5 décrit la chaîne de traitement opérationnelle.

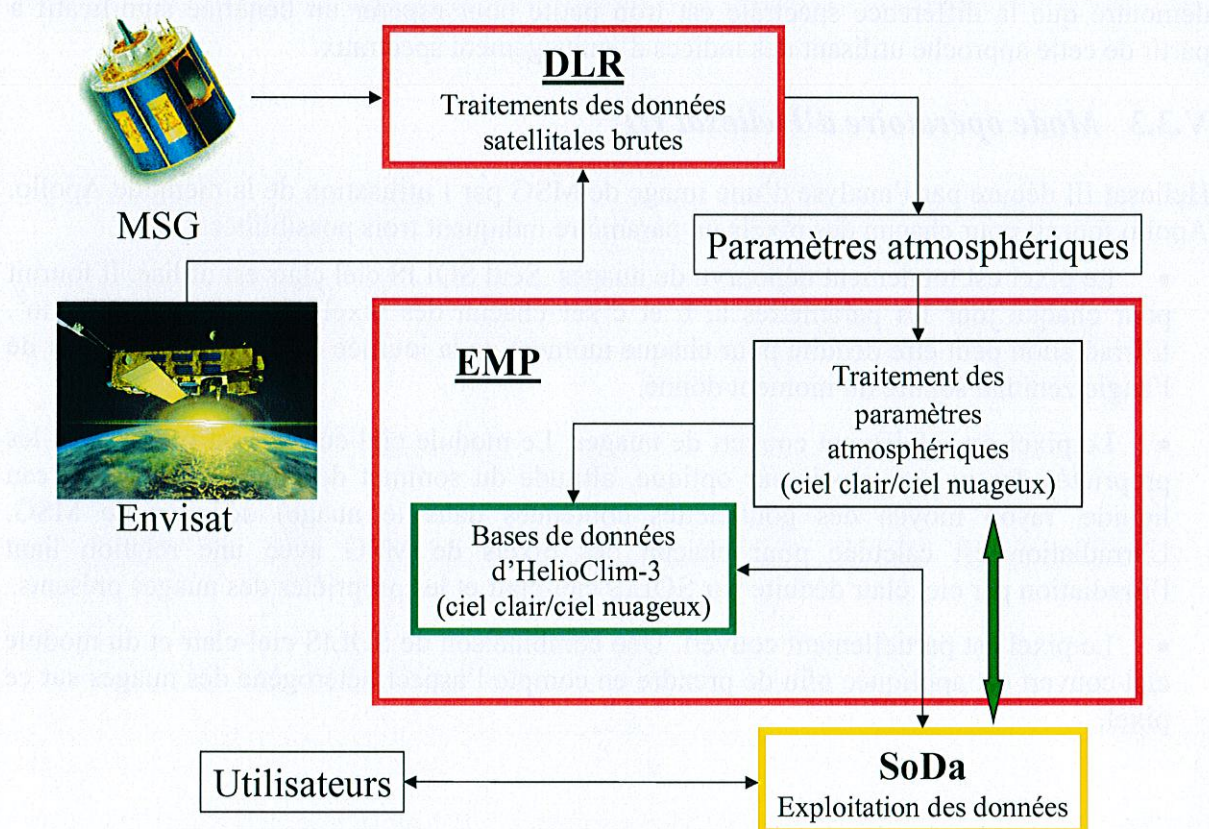


Figure V.5 : Schéma général de la chaîne opérationnelle de traitement des données satellitales

Le premier élément de la chaîne est le traitement des données brutes satellitales pris en charge par le DLR. Ce traitement fournit à l'école des mines les paramètres atmosphériques utilisés comme données d'entrée à la méthode Heliosat III. Le DLR estime la concentration en ozone et en aérosols avec le capteur Sciamachy embarqué à bord du satellite Envisat. Les paramètres nuageux ainsi que la vapeur d'eau sont estimés à partir des données de MSG.

Le traitement des paramètres de ciel clair et des paramètres nuageux s'effectue séparément. En effet, les paramètres nuageux sont disponibles toutes les 15 min grâce à la haute-résolution temporelle de MSG tandis que les paramètres de ciel clair ne peuvent être estimés que de manière journalière étant donnée la basse résolution temporelle du satellite Envisat due à son orbite à défilement et non géostationnaire comme pour MSG. Bien que déduite des données de MSG, la vapeur d'eau requiert un traitement particulier qui ne la rend disponible qu'une fois par jour (Müller *et al.* 2004).

Indépendamment de la division modulaire d'Heliosat III en SOLIS *ciel clair* et en un module nuageux, nous avons scindé Heliosat III en trois parties distinctes pour son application opérationnelle adapté aux spécifications d'HelioClim-3:

- Heliosat III-A calcule les paramètres a, b et c à partir des paramètres atmosphériques de ciel clair. Il s'agit en fait de la première étape de SOLIS *ciel clair*,
- Heliosat III-B calcule l'irradiance pour une longueur d'onde donnée pour tout type de ciel,
- Heliosat III-C calcule l'irradiance intégrée sur une bande spectrale donnée pour tout type de ciel.

V.4.2 Acquisition, traitement et stockage des données de ciel clair

Les paramètres de ciel clair sont transférés, *via* Internet par le protocole FTP, du DLR vers Sophia Antipolis. Ces paramètres sont les entrées de SOLIS *ciel-clair*, c'est-à-dire :

- la concentration en ozone,
- le rapport de mélange de vapeur d'eau,
- la concentration en aérosols,
- le type d'aérosol,
- la saison.

Ces paramètres sont reçus quotidiennement avec une résolution spatiale d'environ 100x100 km² pour l'ensemble du champ de vue du MSG conformément aux formats des entrées requis pour SOLIS *ciel clair*. Nous traitons ces paramètres avec Heliosat III-A. Nous obtenons les paramètres synthétiques a, b et c correspondant à l'état optique du ciel clair pour chacun des pavés 100x100 km². Nous calculons ces paramètres pour 21 bandes spectrales distinctes du rayonnement visible ainsi que pour une bande large englobant ces dernières.

En reprenant un des principes de la conception d'HelioClim-1 (chapitre III), nous avons décidé de ne pas stocker dans la base de données d'HelioClim-3 les résultats finaux de SOLIS *ciel-clair*, à savoir l'irradiation globale par ciel clair et ses composantes directe et diffuse disponibles toutes les 15 minutes. Nous avons choisi de stocker les paramètres synthétiques

spectraux a, b et c, chacun sur deux octets, et ce, pour chacune des vingt-deux bandes spectrales. Nous laissons le calcul de l'irradiation pour le module de la requête utilisateur. La figure V.6 récapitule le procédé de stockage des données de ciel clair.

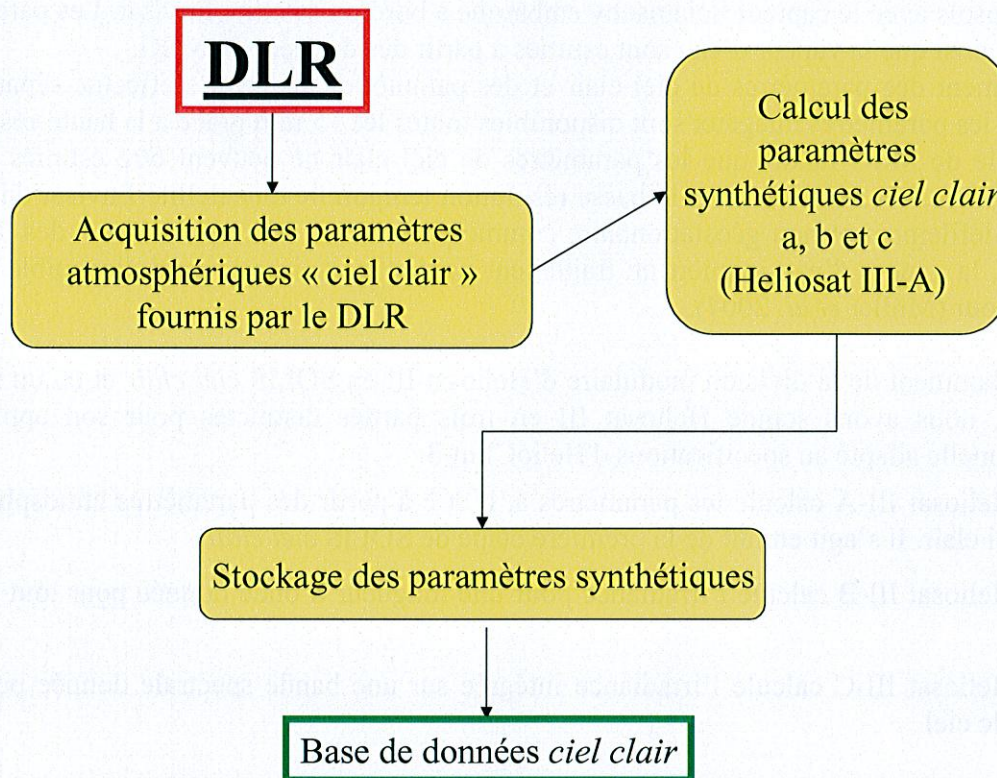


Figure V.6 : Chaîne de traitement des paramètres ciel clair

V.4.3 Acquisition, traitement et stockage des données de ciel nuageux

Les paramètres nuageux sont transférés par FTP du DLR vers Sophia Antipolis. Ces paramètres sont les entrées du module de ciel nuageux d'Heliosat III et sont :

- l'état du ciel (clair/partiellement nuageux/couvert),
- l'épaisseur optique du nuage,
- le rayon moyen des particules d'eau condensée composant le nuage.

Ces paramètres sont reçus toutes les 15 min. avec une résolution spatiale identique à celle des canaux visibles de MSG, soit $3 \times 3 \text{ km}^2$ au nadir, pour l'ensemble du champ de vue de MSG (figure V.7).

Nous stockons directement ces paramètres sans traitement dans la base de données d'HelioClim-3 dédiée aux paramètres nuageux. Ce choix se justifie d'une part par le gain de place moins conséquent que l'ensemble des irradiances globales directe et diffuse pour chaque longueur d'onde. D'autre part nous gardons la possibilité de modifier *a posteriori* la méthode (Heliosat III-B et Heliosat III-C) pour calculer l'éclairement à partir de ces paramètres.

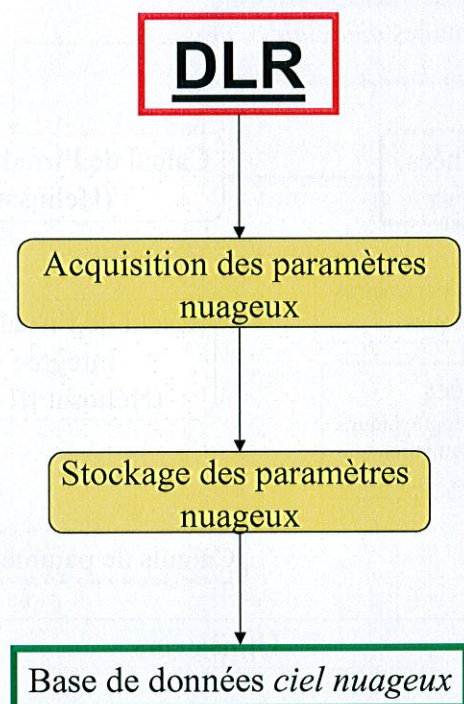


Figure V.7 : Chaîne de traitement des données nuageuses.

V.4.4 Gestion de la requête utilisateur

Le principe du module de la requête utilisateur est décrit en figure V.8. Les paramètres synthétiques de ciel clair ainsi que les paramètres nuageux correspondants à la requête sont extraits. Heliosat III-B calcule à partir de ces paramètres l'éclairement pour une longueur d'onde donnée. Heliosat III-C calcule l'éclairement spectralement intégrée si une bande spectrale est requise par l'utilisateur. Le module de calculs spécifiques convertit l'éclairement en paramètres avancés pour les utilisateurs tels que l'irradiation sur plan incliné, la fraction photo-synthétiquement active ou l'illuminance.

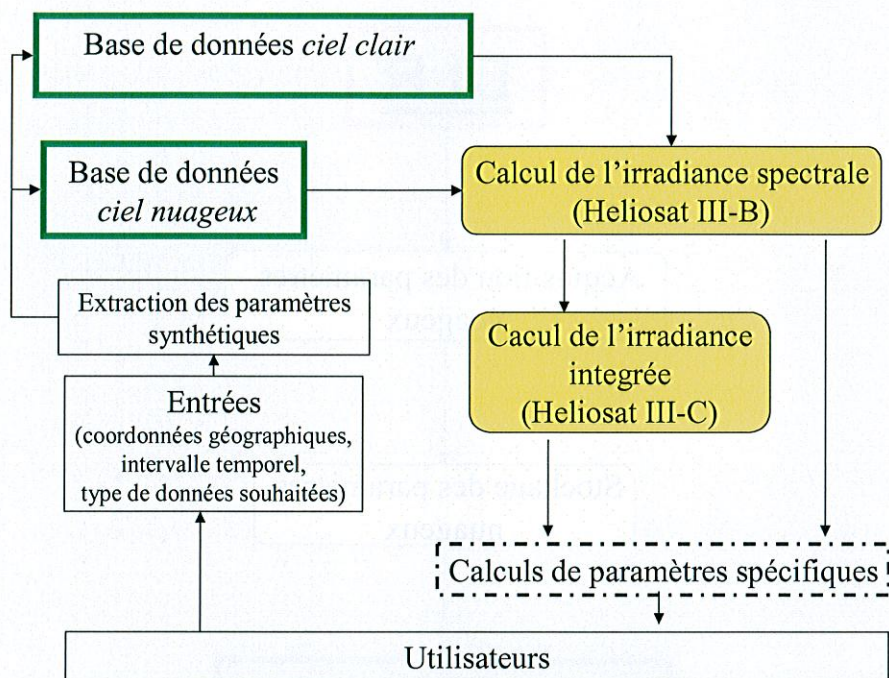


Figure V.8 : Schéma du module de la requête utilisateur

Chapitre VI

Création d'une climatologie des aérosols par méthode de fusion de données

La méthode Heliosat III requiert la connaissance journalière de l'épaisseur optique des aérosols à une résolution spatiale de $50 \times 50 \text{ km}^2$. Dans le cadre opérationnelle de cette méthode, le DLR fournira ces informations grâce aux mesures effectués par Envisat. Afin de remédier à une éventuelle indisponibilité de ces mesures, il est nécessaire de recourir à des cartes climatologiques des propriétés optiques des aérosols.

Pour une couverture mondiale, ce type d'information climatologique n'est généralement disponible qu'en basse résolution spatiale, environ 5 degrés d'arc. (environ 600 km), soit une taille de pixel près de 10 fois plus grande que la résolution requise pour Heliosat III. Cette basse résolution apporte une incertitude supplémentaire à l'estimation du rayonnement par ciel clair. Un simple sur-échantillonnage à la taille requise n'apporte pas d'information supplémentaire sur la distribution spatiale des aérosols. Par ce procédé, l'épaisseur optique contenue dans un pixel est calculée à partir de celles présentes dans les pixels voisins. L'incertitude engendrée par une information de basse résolution spatiale n'en est pas forcément réduite.

Nous relatons dans ce chapitre l'application d'une méthode de fusion de données sur les cartes du GADS (*Global Aerosol Data Set*) (Koepke *et al.* 1997). Cette méthode a été conçue pour augmenter la résolution spatiale d'une image en y intégrant des informations fournies par une autre image de plus haute résolution dans la mesure où le contenu de l'une doit être physiquement corrélé à celui de l'autre.

VI.1 Améliorer la résolution spatiale par méthode de fusion de données

VI.1.1 Position du problème

Soit une image nommée $S(0)_{r0}$ d'une résolution spatiale $r0$ ($r0$ est équivalente à la taille de chacun des pixels). Soit un ensemble de i images $S(i)_{ri}$, $i=1, \dots, N$, présentant une résolution spatiale ri . Les images $S(i)$ sont classées par ordre croissant de résolution spatiale, rN est la plus haute résolution.

On suppose que $S(i)$ et $S(0)$ sont géométriquement alignées. On suppose également que chaque image $S(i)$ peut être associée à $S(0)$, c'est-à-dire qu'il existe une relation entre les données de $S(0)$ et celles de $S(i)$ pour une résolution r donnée. Le problème consiste à synthétiser $S(0)_{rN}$.

VI.1.2 Présentation du concept ARSIS

L'application du concept ARSIS (amélioration de la résolution spatiale par injection de structure) est une des ces solutions à ce problème (Ranchin *et al.* 2003 ; Ranchin et Wald 2000 ; Wald 2002).

Dans ce concept, on considère que les informations manquantes permettant de synthétiser $S(0)_{rN}$ à partir de $S(0)$, sont composées de hautes fréquences spatiales de $S(0)$, comprises entre $1/(2r0)$ et $1/(2rN)$. Cet intervalle de hautes fréquences (noté HF) est présent dans les autres

ensembles de données, par exemple $S(i)$ présente des fréquences comprises entre $1/(2r_0)$ et $1/(2r_i)$. Une modélisation appropriée permet de synthétiser $S(0)_{HF}$ à partir de $S(i)_{HF}$ qui est connu. Ensuite, l'application d'un modèle à multi-échelles construit $S(0)_{rN}$ à partir de $S(0)_{r0}$ en utilisant l'intervalle HF estimé.

VI.1.3 Comment estimer $S(0)_{HF}$?

$S(0)_{r0}$ ne contient pas de fréquences plus hautes que $1/(2r_0)$:

$$S(0)_{HF_r}=0, \text{ pour } r < r_0 \quad (6.1)$$

Soit AME, le procédé d'analyse multi-échelles. Le couple d'information $(S(i)_{r0}, S(i)_{HF_{r0-r_i}})$ construit à partir de l'approximation de $S(i)$ à la résolution r_0 et les hautes fréquences de $S(i)$ dans l'intervalle $[1/(2r_0), 1/(2r_i)]$ est obtenu en appliquant l'analyse multi-échelles aux données $S(i)_{ri}$:

$$(S(i)_{r0}, S(i)_{HF_{r0-r_i}}) = AME(S(i)_{ri}) \quad (6.2)$$

Le procédé d'analyse multi-échelle peut être l'algorithme d'analyse multi-résolution de Mallat (1989), l'algorithme "à trous" (Dutilleul 1989 ; Starck et Murtagh 1994) ou la pyramide laplacienne généralisée (Aiazzi *et al.* 1999). L'analyse multi échelle est inversible et le procédé de synthèse est alors noté AME^{-1} :

$$S(i)_{ri} = AME^{-1}(S(i)_{r0}, S(i)_{HF_{r0-r_i}}) \quad (6.3)$$

Supposons que :

$$S(0)_{r0} = F_0(S(i)_{r0}) + \varepsilon_0 \quad (6.4)$$

où F_0 and ε_0 sont connus par régression statistique par exemple. On note $var(0)$ la fraction de la variance dans $S(0)_{r0}$ déterminée par $F_0(S(i)_{r0})$. Si l'on écrit :

$$S(0)_{r1}^* = AME^{-1}[S(0)_{r0}, var(0) F_0(S(i)_{HF_{r0-r_1}})] \quad (6.5)$$

où $S(i)_{HF_{r0-r_1}}$ est obtenu en appliquant l'analyse multi-échelles à $S(i)_{ri}$, $S(0)_{r1}^*$ est une estimation de $S(0)_{r1}$.

Comme le modèle F_0 n'est pas exact et a été évalué à une autre résolution r_0 , alors qu'il a été appliqué à l'intervalle $[r_1, r_0]$,

$$(S(0)_{r0}^*, S(0)_{HF_{r0-r_1}}^*) = AME(S(0)_{r1}^*) \quad (6.6)$$

$S(0)_{r0}^*$ n'est pas égal à $S(0)_{r0}$ alors que le produit fusionné doit être identique au produit initial à la résolution r_0 . On le corrige en écrivant :

$$S(0)_{r1} = AME^{-1}(S(0)_{r0}, S(0)_{HF_{r0-r_1}}^*) \quad (6.7)$$

La procédure est réitérée. A chaque étape et résolution r_i , on utilise les ensembles de données $S(i)$ de plus haute résolution que r_i .

A la fin de la procédure, on obtient $S(0)_{r_N}$ qui est une approximation vraie - mais inconnue - des données originales. Dans tous les cas, ces données représentent mieux la réalité que ce que l'on obtient avec un ré-échantillonnage de $S(0)_{r_0}$.

Cette procédure a été proposée par Wald et Ranchin (2003) et appliquée avec succès pour synthétiser des cartes du trouble de Linke à 5' d'arc comme résolution spatiale (Lefèvre *et al.* 2004).

VI.2 Application

VI.2.1 Cartes utilisées

$S(0)_{r_0}$ est une carte du GADS de résolution spatiale $r_0=5^\circ$ (environ 650 km) présentant la distribution spatiale de l'épaisseur optique des aérosols sur le monde entier. Nous disposons de ce type de carte pour les 6 principaux types d'aérosols (composés solubles, insolubles, carbonés, minéraux et deux types de sels marins) pour deux saisons distinctes (été et hiver), ce qui correspond aux entrées requises pour les aérosols dans la méthode Heliosat III.

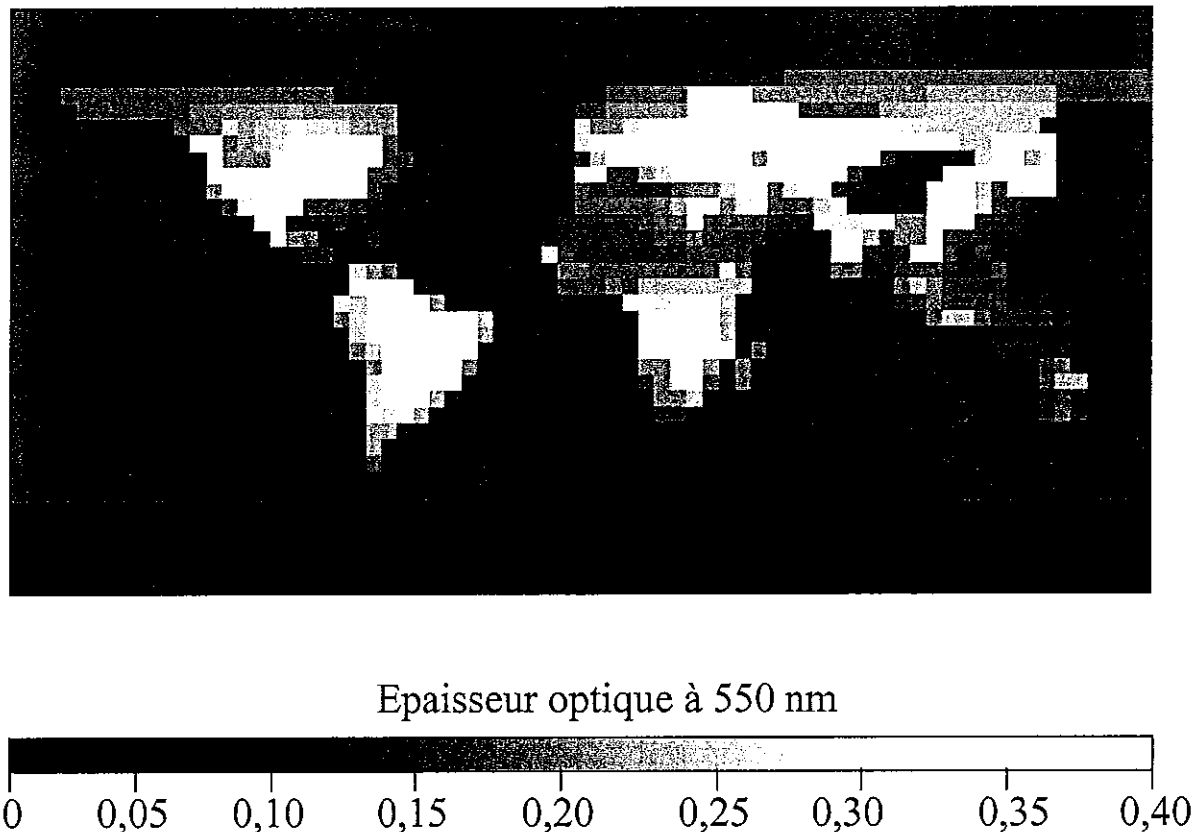


Figure .VI.1 : Epaisseur optique des aérosols solubles en été (humidité relative : 50 %)

Cet ensemble de données comprend dans sa totalité 12 cartes. La figure VI.1 montre la carte de l'épaisseur optique des aérosols solubles, en été, dans une atmosphère pourvue de 50 % d'humidité relative. On remarque tout d'abord une résolution spatiale tout juste suffisante à montrer que ce type d'aérosol est présent en plus grande concentration au-dessus des continents. En effet, ces derniers sont reconnaissables malgré leurs contours grossièrement dessinés par la grande taille des pixels.

Les images susceptibles de correspondre à $S(N)_{iN}$ sont deux cartes de meilleure résolution spatiale de 5' d'arc, soit environ 10 km, couvrant la même surface géographique et géométriquement alignées à celles du GADS. La première est un modèle numérique de terrain appelé TerrainBase, présenté en figure VI.2 (TerrainBase 1998). Cette carte présente une résolution spatiale assez élevée pour apprécier les contours des continents et visualiser nettement les zones montagneuses (niveaux de gris clairs) sur une échelle mondiale.

Nous avons choisi d'utiliser cette carte comme une des sources $S(i)_i$ pour améliorer les cartes d'aérosols $S(0)_{i0}$ car l'épaisseur optique des aérosols varient généralement avec l'élévation. Nous avons donc une raison de supposer qu'il y ait une corrélation entre TerrainBase et les cartes du GADS.

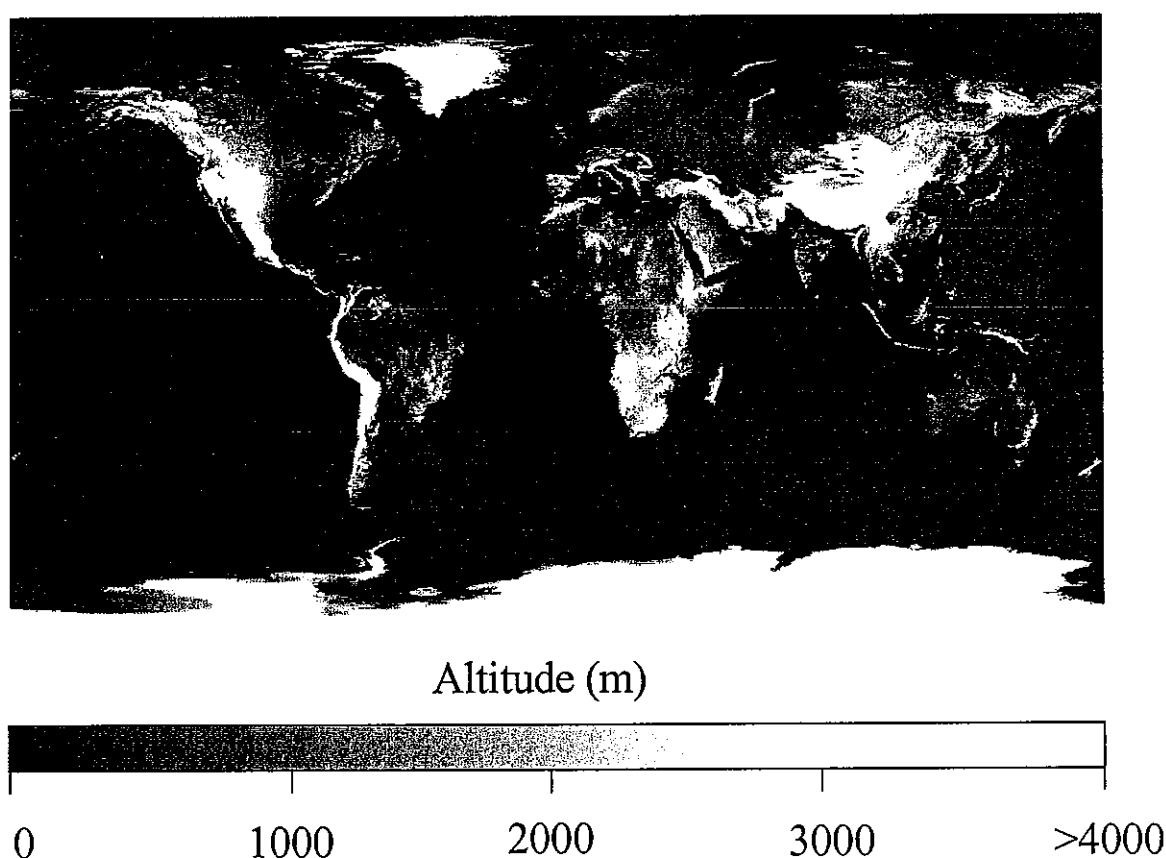


Figure VI.2 : Modèle numérique de terrain TerrainBase

La deuxième contient les valeurs moyennes du trouble de Linke pour le mois de juillet sur le monde entier (Figure VI.3). Le trouble de Linke, rappelons-le, est un facteur exprimant

l'atténuation optique des aérosols et de la vapeur d'eau. Là aussi, nous supposons qu'il existe une corrélation entre les cartes d'aérosols et cette carte.

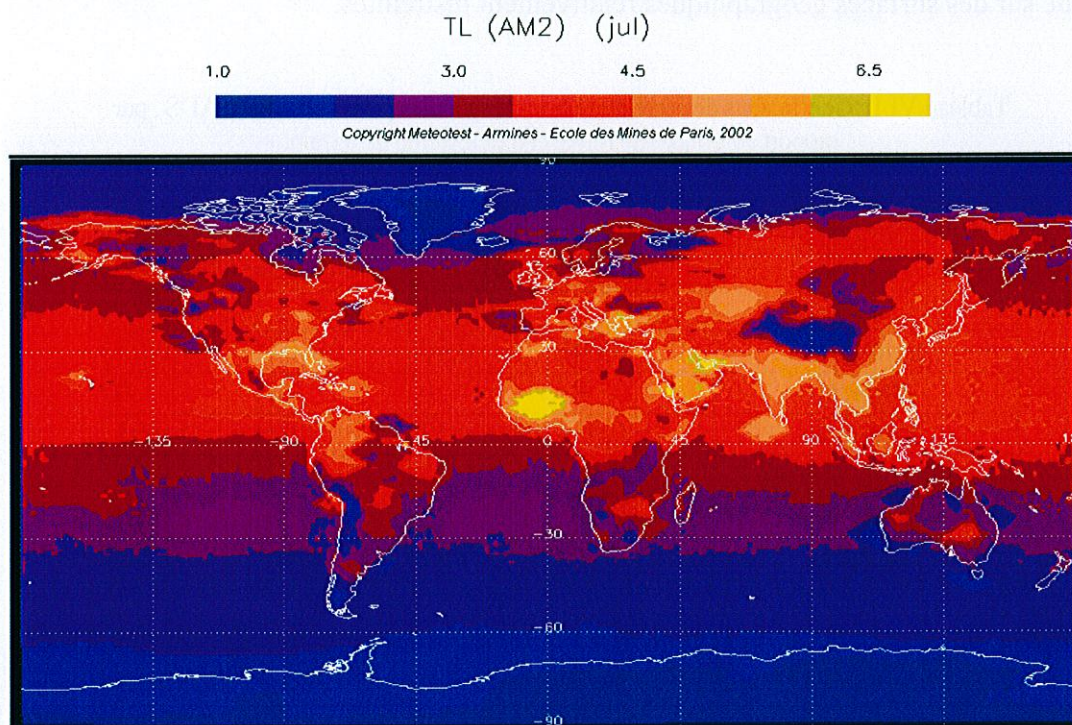


Figure VI.3 : Carte du trouble de Linke pour le mois de juillet

VI.2.2 Analyse des corrélations

Rappelons que $S(i)_{ri}$ doit vérifier les conditions suivantes afin de pouvoir être utilisée pour la synthèse de $S(0)_{rN}$:

- $S(i)_{ri}$ est géométriquement alignée avec $S(0)_{r0}$,
- ri est supérieure à $r0$,
- les valeurs contenues dans $S(i)_{ri}$ doivent pouvoir être physiquement associées avec celle de $S(0)_{r0}$.

Les deux premières conditions sont vérifiées. Il nous reste à analyser les corrélations entre les cartes du GADS et TerrainBase, et entre les cartes du GADS et la carte du trouble de Linke.

Nous avons choisi comme modèle F_0 une fonction linéaire. Nous avons alors calculé le coefficient de corrélation linéaire entre l'ensemble des cartes du GADS et TerrainBase, puis entre les cartes GADS et le trouble de Linke. Ces coefficients sont présentés dans le tableau VI.1. Nous remarquons que l'élévation de terrain ne présente pas de corrélation significative avec l'épaisseur optique de n'importe quel type d'aérosol et ce, été comme hiver. Ce résultat nous a peu surpris, car il est admis que l'épaisseur optique des aérosols diminue avec l'épaisseur de l'atmosphère, c'est-à-dire avec l'augmentation de l'altitude. Il est possible que cette non-corrélation soit due à l'influence des pixels « océan » pour lesquels il n'y a pas de variation d'altitude mais par contre des variations des paramètres optiques. La corrélation

entre le trouble de Linke et les aérosols est plus élevée notamment en été tout en restant faible. Les aérosols minéraux présentent une corrélation nulle car leur épaisseur n'est non nulle que sur des surfaces géographiques relativement restreintes.

Tableau VI.1 : Coefficients de corrélation linéaire calculés pour les cartes GADS, par rapport au trouble de Linke et à l'élévation de terrain.

Type d'aérosol	Coefficient de corrélation (trouble de Linke/GADS)		Coefficient de corrélation linéaire (TerrainBase/GADS)	
	hiver	été	hiver	été
Insoluble	-0.04	0.10	-0.04	-0.03
Minéral	0	0	0	0
Carboné	0.03	0.12	0.02	0.02
Sels marins (classe I)	0.11	-0.11	0.01	0.06
Sels marins (classe II)	0.10	0.23	0	0.04
Soluble	0.10	0.41	-0.04	-0.03

Notons que plus le coefficient de corrélation est élevé, plus le modèle F_0 sera précis. La qualité de $S(0)_{rN}$ sera d'autant meilleure si le coefficient de corrélation est élevé. L'absence de corrélation rend la méthode de fusion de données équivalente à un sur-échantillonnage par interpolation linéaire de $S(0)_{r0}$, autrement dit $S(0)_{rN}$ ne contiendra pas plus d'informations que $S(0)_{r0}$.

VI.2.3 Application du concept ARSIS

Nous avons choisi d'appliquer ARSIS uniquement sur la carte d'été des aérosols solubles en utilisant la carte du trouble de Linke correspondant à la même saison. En effet, ces deux cartes présente une corrélation assez élevée pour espérer un bénéfice conséquent de précision dans le contenu de l'image synthétisée $S(0)_{rN}$ par rapport à $S(0)_{r0}$.

Notre objectif étant de convertir les cartes du GADS à une résolution de $0,5^\circ$ (environ 50 km) comme l'exige la méthode Heliosat III, nous avons tout d'abord sous-échantillonné la carte du trouble de Linke, de sa résolution originale de $5'$ à $0,5^\circ$.

Nous avons choisi l'algorithme multi-échelle (AME) "à trous" recommandé par Ranchin (2004, communication personnelle) pour ce cas. Cet algorithme est basé sur la décomposition en ondelettes de $S(0)_{r0}$ et de $S(i)_{ri}$. $S(0)_{HF}$ et $S(i)_{HF}$ sont caractérisées par les coefficients d'ondelettes de $S(0)_{r0}$ et $S(i)_{ri}$.

Les coefficients de la fonction affine F_0 ont été obtenus par régression linéaire entre les valeurs de $S(0)_{r0}$ et $S(N)_{rN}$. Notons que, dans notre cas N , est égal à 1, r_0 vaut 5° et r_1 vaut $0,5^\circ$.

VI.3 Résultats

Nous obtenons l'image synthétisée $S(0)_{0,5}$ présentée à la figure VI.4.

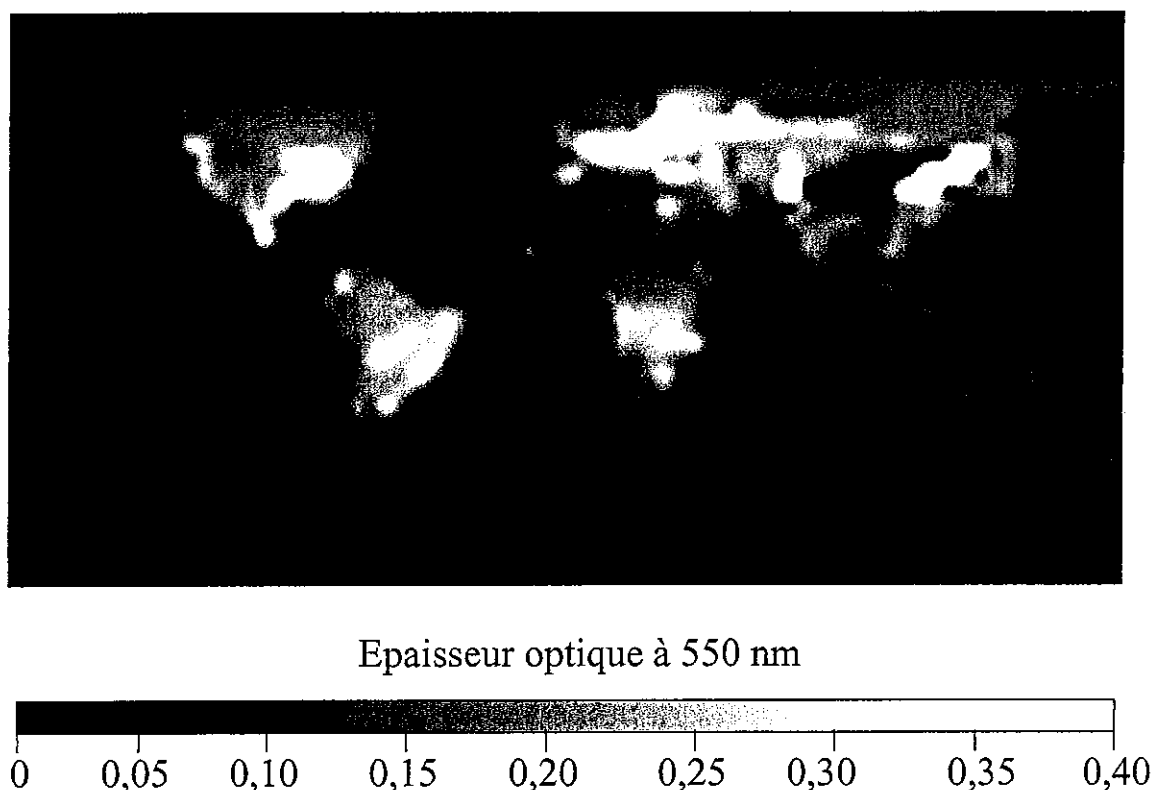


Figure VI.4 : Epaisseur optique des aérosols solubles en été après traitement par fusion de données.

Si l'aspect flou de l'image et la conservation de l'aspect général de la distribution spatiale de l'épaisseur optique peut faire penser au résultat d'un sur-échantillonnage de $S(0)_{r0}$ (figure VI.1), nous pouvons néanmoins remarquer que cette image présente des fréquences spatiales plus élevées que l'image présentée à la figure VI.1. Tout d'abord, le contour des continents semble mieux dessiné que s'il avait été simplement "lissé" par une simple interpolation des pixels. Nous pouvons le vérifier en observant le modèle numérique de terrain de plus haute résolution sur la figure VI.2. Ensuite, nous pouvons constater une distribution spatiale plus détaillée au-dessus du Brésil, de l'Afrique australe et de l'Asie centrale.

Afin de vérifier que la présence de ces fréquences spatiales plus élevées se traduit effectivement par une information plus précise, ou tout au moins aussi précise de l'épaisseur optique des aérosols comparée aux cartes du GADS, nous avons comparé les valeurs du GADS et de cette image avec des données issues de mesures photométriques à partir du sol.

VI.4 Comparaisons avec des données *in-situ*

VI.4.1 Le réseau photométrique AERONET

Ce réseau se compose de stations destinées à évaluer les propriétés optiques des aérosols par mesures photométriques. Les données sont distribuées gratuitement sur le web. Nous avons sélectionné onze sites en tenant compte des critères suivants :

- chaque site doit présenter une épaisseur optique des aérosols solubles élevée selon la figure VI.4.
- ces sites doivent être situés dans des zones de haute fréquences spatiales de la même figure,
- cette sélection de site doit présenter une diversité de régions et climats à travers le monde.

Tableau VI.2: Stations du réseau AERONET sélectionnées pour évaluer la qualité des données contenues dans la carte synthétique des aérosols (les coordonnées géographiques sont en degrés décimaux).

Pays	Stations	Latitude	Longitude
Etats-Unis	Philadelphie	40,03	-75
France	Clermont-Ferrand	45,75	2,95
Russie	Moscou	55,7	37,5
Mongolie	Ulaangom	49,97	92,67
Brésil	Sao Paulo	-23,55	-46,73
Zambie	Kaloma	-14,85	24,82
Allemagne	Leipzig	51,35	12,43
Maldives	Kaashidhoo	4,95	73,45
Surinam	Surinam	5,78	-55,2
Corée du Sud	Séoul	37,45	126,95
Sénégal	Dakar	14,38	-16,95

VI.4.2 Méthodologie des comparaisons

VI.4.2.1 Conversion de l'épaisseur optique à différentes longueurs d'ondes

L'épaisseur optique par AERONET est disponible à 440, 500, 670, 870 et 1020 nm. Les données GADS sont disponibles à 550 nm. Afin d'obtenir l'épaisseur optique d'AERONET à 550 nm, Schroedter-Homscheidt (2004, communication personnelle) recommande d'effectuer une interpolation entre celle à 500 nm et celle à 670 nm en utilisant la formule de la turbidité d'Angström :

$$\tau_{\lambda} = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (6.8)$$

où :

- τ_{λ} est l'épaisseur optique à la longueur d'onde λ ,
- β est le coefficient de turbidité d'Angström, il représente la quantité d'aérosols présents dans l'atmosphère dans la direction verticale,
- α est l'exposant de longueur d'onde, il est lié à la taille des particules et varie entre 0 (pour des particules de très grande taille) et 4 (pour des aérosols de la taille des molécules).

A partir de $\tau_{\lambda=500 \text{ nm}}$ et $\tau_{\lambda=670 \text{ nm}}$, nous déduisons les valeurs de α et β pour chacun des types d'aérosols. Nous pouvons alors calculer avec (6.8) les valeurs de $\tau_{\lambda=550 \text{ nm}}$.

VI.4.2.2 Calcul de l'épaisseur optique de l'ensemble des types d'aérosols

Nous avons additionné les valeurs contenues dans $S(0)_{\text{FN}}$ avec les épaisseurs optiques des autres types d'aérosols en ayant au préalable sur-échantillonné les autres cartes de 5° à $0,5^{\circ}$.

VI.4.2.3 Comparaisons

Pour chacun des sites sélectionnés, nous calculons la différence entre les données AERONET et les données GADS avant traitement, puis nous calculons la différence entre les données AERONET et les données GADS après application de la méthode de fusion de données.

VI.4.3 Résultats des comparaisons

Tableau VI.3 : statistiques des différences entre l'épaisseur optique mesurée par AERONET et les données GADS avant traitement

Comparaison	Valeur moyenne AERONET	Biais	EQM	Coefficient de corrélation	Nombre de mesures
AERONET – GADS avant traitement	0,23	0,06 (26%)	0,16 (69 %)	0,25	11

Tableau VI.4 : statistiques des différences entre l'épaisseur optique mesurée par AERONET et les données GADS après traitement

Comparaison	Valeur moyenne AERONET	Biais	EQM	Coefficient de corrélation	Nombre de mesures
AERONET - GADS après traitement	0,23	0,06 (26 %)	0,17 (75 %)	0,22	11

Le tableau VI.3 présente les résultats des comparaisons entre les données GADS avant notre traitement et les mesures AERONET. Nous remarquons que l'EQM et le biais relatif sont élevés. Le coefficient de corrélation est très bas.

Le tableau VI.4 présente les résultats des comparaisons entre les données GADS après notre traitement et les mesures AERONET. L'EQM relatif légèrement plus élevé qu'au cas précédent. Le biais est identique et le coefficient de corrélation est légèrement plus bas.

Nous en concluons que ces comparaisons ne mettent pas en évidence une amélioration des données d'aérosols sans non plus en présenter une dégradation significative.

VI.5 Discussions

L'application de cette méthode n'apporte ni gain ni vraiment une perte d'information. Rappelons que seul un type d'aérosols a subi ce traitement parmi les 6, les corrélations étant trop basses avec les cartes du trouble de Linke et de l'élévation de terrain. Cependant il existe peu de paramètres géographiques ou météorologiques pouvant se corréler avec l'épaisseur optique des aérosols. D'autres corrélations plus élaborées que la corrélation linéaire pourraient être étudiées.

Chapitre VII

Conclusion

Cette thèse a pour objet de contribuer à la création de bases de données climatologiques du rayonnement solaire incident en ondes courtes sur une longue période pour une grande zone géographique, et des systèmes d'information associés destinés à fournir l'information requise par les usagers. J'ai apporté une réponse en participant fortement à la création des systèmes HelioClim : systèmes fournissant des données d'éclairement ou d'irradiation sur l'Europe, l'Afrique et l'océan Atlantique de 1985 à nos jours, et devant intégrer les bénéfices des nouveaux outils satellitaires et des nouvelles méthodes d'estimation du rayonnement à partir de 2005.

Pour cela, j'ai tout d'abord proposé une typologie des différentes sources du rayonnement solaire disponibles aux utilisateurs. J'ai analysé les performances de chacun des types de sources selon les critères établis par les besoins des utilisateurs. Cette typologie et cette analyse ont permis de mettre en évidence les lacunes de l'information disponibles et de montrer que les estimations satellitaires associées aux systèmes d'information intégrés et coopératifs sont les outils les plus performants pour répondre à ces manques. Je me suis particulièrement intéressé aux lacunes suivantes :

- une résolution spatio-temporelle plus fine ainsi qu'une couverture spatio-temporelle élargie,
- une évaluation de la qualité des données devant être fournie aux usagers,
- un format standard des données quelque soit le lieu requis,
- la délivrance immédiate des données requises,
- un accès simple par le web.

J'ai ensuite spécifié un modèle de base de données pour le système d'information intégré HelioClim-1. J'ai établi une configuration de l'implémentation de la méthode Heliosat II où l'algorithme est séparé en deux parties, l'une destinée à l'alimentation de la base de données d'HelioClim-1 et l'autre à son interrogation. L'avantage majeur du système HelioClim-1 est de pouvoir améliorer la deuxième partie de la méthode Heliosat II sans avoir à reconstruire la base de données mais en modifiant uniquement le logiciel d'exploitation des données. J'ai appliqué ce traitement à une série temporelle d'images Meteosat de 1998 à 2003, soit environ 18000 images. Pour ce traitement, j'ai choisi une procédure d'étalonnage plus rapide à mettre en œuvre et de qualité équivalente à celle utilisée pour la série de 1985 à 1997 par mes prédécesseurs (Rigollier *et al.* 2002). Cette nouvelle procédure tient compte de la variation continue de la sensibilité du capteur de Meteosat-7, constatée par des utilisateurs d'images puis confirmée en 2003 par les fournisseurs de données Meteosat.

Ces travaux ont apporté à HelioClim-1 des caractéristiques plus performantes que les bases de données climatologiques du rayonnement solaire existantes par rapports aux lacunes susmentionnées. Ce système délivre des données sous forme de séries temporelles de 1985 à 2004 alors que la plupart des séries temporelles issue de l'imagerie satellitaire ne dépassent pas quelques années. Par exemple les bases de données SRB (*Surface Radiation Budget*) et SSE (*Surface meteorology and Solar Energy*) les deux plus usitées en énergétique, couvrent respectivement les années 1983 à 1991 et 1983 à 1993. En outre, l'échantillonnage d'HelioClim-1 est plus fin que celui de SRB et SSE : une journée dans le premier cas, un mois dans le second.

La couverture spatiale de HelioClim-1 est plus limitée que celle de SRB. Cependant, le niveau de détail pour la distribution spatiale est plus élevé avec HelioClim-1. Ceci est illustré par les figures VII.1 et VII.2. La figure VII.1 présente une carte de la moyenne décennale du mois d'août (1993-2002) de l'irradiation journalière. La figure VII.2 présente une carte d'informations similaires fournie par le SSE. Cette figure, comparée à la figure VII.1, met en évidence la taille grossière du support spatial de l'information sur une échelle nationale. HelioClim-1 a donc l'avantage de fournir des cartes de résolution spatiale élevée à de petites échelles sur près d'un tiers de la surface terrestre, et ce malgré la procédure d'interpolation spatiale intégrée dans le système.

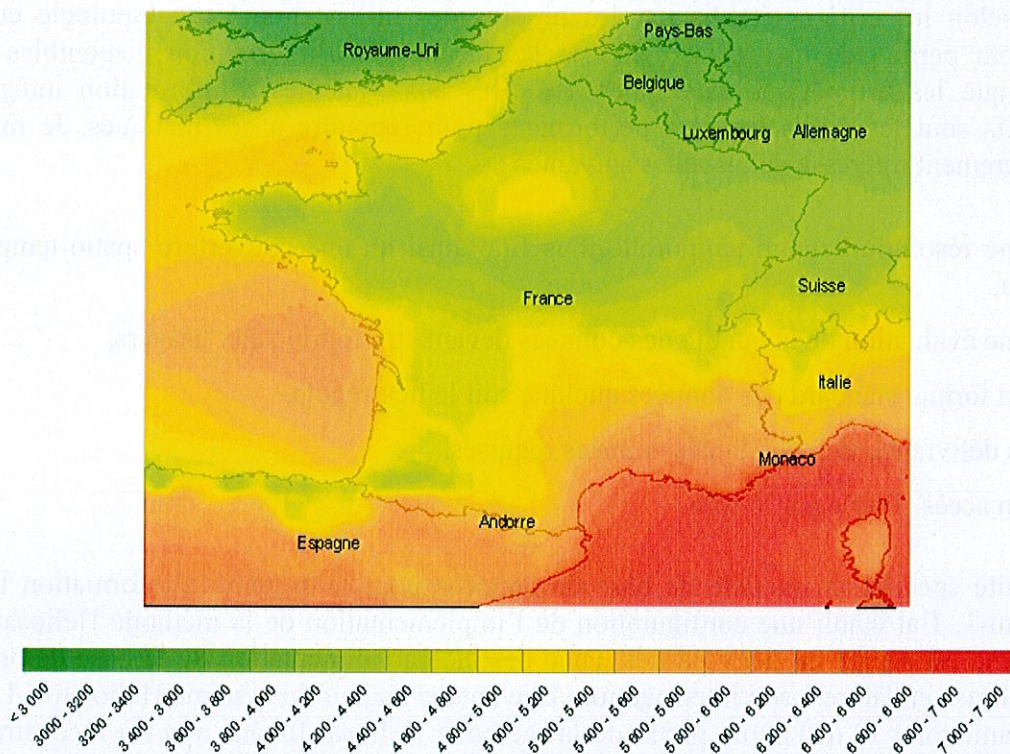


Figure VII.1 : Exemple de carte construite à partir des données d'HelioClim-1. Cette carte représente la moyenne décennale du mois d'août (1993-2002) de l'irradiation journalière.

HelioClim-1 représente également un modèle de système d'information climatologique applicable à d'autres séries temporelles d'images de satellites météorologiques. Il représente donc une solution efficace pour fournir des informations de qualité sur le rayonnement solaire pour de longues séries temporelles à grande couverture géographique. Ce système est opérationnel. Il a été consulté 1500 fois au cours de l'année 2003 et plus de 2000 fois entre janvier et juin 2004 par les utilisateurs.

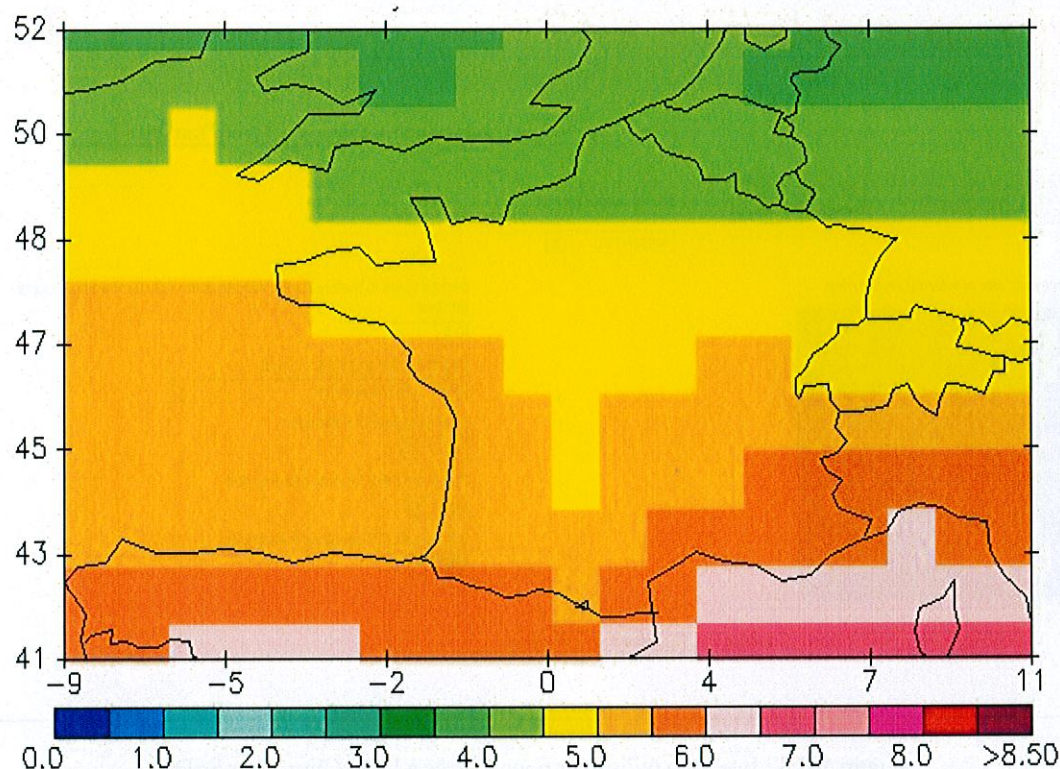


Figure VII.2 : Exemple de données du serveur SSE. Cette carte représente la moyenne mensuelle décennale du mois d'août (1983-1993) de l'irradiation journalière pour la France, exprimée en kWh/m². On remarquera que les unités présentées en légende ne sont pas correctes pour des irradiances.

La connexion de HelioClim-1 au service web SoDa a permis de combler d'autres lacunes, à savoir un accès simple par le web et un format standard de données. La figure VII.3 montre un exemple d'interface utilisateur pour l'accès à HelioClim-1 par SoDa. Les éléments de localisation géographique et de sélection de périodes temporelles sont les mêmes pour toutes les ressources du service SoDa. Cela crée un standard *de facto* et les usagers en prennent facilement l'habitude. La figure VII.4 présente la sortie, en format HTML, correspondant à la requête présentée par la figure précédente. Y sont portés, la date, l'irradiation journalière et un indicateur de fiabilité. D'autres formats sont disponibles, comme par exemple la séparation par virgule qui permet d'exporter ces valeurs vers un tableur.

SoDa
Integration and exploitation of networked Solar radiation Databases for environment monitoring

Solar Radiation Data Assessed from Satellite Data


Execute SoDa

Execute GeoSearch

Select output format

SoDaHTML

Select your site of interest on the map



Lat

43.6333

Lon

7

☐ zoomin

☐ zoomout

☐ select

Enter a value in meters for the altitude of the site. 0 means database retrieval

0.0

Select the parameter to estimate

Daily Sum of Irradiation

Select the year of estimation

2004

Select the FIRST month of the period

Apr

Select the LAST month of the period

May

Figure VII.3 : Interface utilisateur pour l'accès à HelioClim-1 par SoDa

SoDa
Integration and exploitation of networked Solar radiation Databases for environment monitoring

Solar data estimation by the Heliosat 2 method

Ecole des Mines de Paris

Site latitude	43.63
Site longitude	7.00
Site altitude (meters)	315
Year of the estimation	2004
First month of the estimation	4
Last month of the estimation	5
Estimated variable	Daily sum of irradiation (Wh/m2)

Daily sum of irradiation (Wh/m2)		
	Estimation(Wh/m2)	Reliability(1..5)
04-04-01	4967	3
04-04-02	6007	3
04-04-03	2190	3
04-04-04	5890	3
04-04-05	6341	3
04-04-06	4890	3
04-04-07	6409	3
04-04-08	5578	3
04-04-09	1007	3
04-04-10	5473	3
04-04-11	6575	3
04-04-12	2842	3
04-04-13	4133	3
04-04-14	5674	3
04-04-15	1543	3
04-04-16	861	3
04-04-17	4092	3
04-04-18	5283	3
04-04-19	6918	3
04-04-20	2166	3

Figure VII.4 : Sorties d'HelioClim-1 en format HTML sur le serveur SoDa.

J'ai évalué la qualité de l'information fournie par HelioClim-1 par comparaison avec des mesures au sol. Cette information est de qualité équivalente aux résultats de la méthode Heliosat II publiés par Rigollier *et al.* (2004). Cette méthode était préalablement considérée comme performante par rapport aux autres algorithmes d'estimation du rayonnement à partir d'images satellitales. J'ai étudié l'influence des conditions géographiques locales, des saisons et de la variabilité temporelle du rayonnement sur cette qualité. Les paramètres ayant une influence significative sur les incertitudes sont le nombre de données satellitales disponibles en une journée et la variabilité temporelle du rayonnement. L'influence de la variabilité locale n'a pas été étudiée car nous n'avons pas à notre disposition des données précises de la variance locale autour d'un point donné. Ces travaux permettent de fournir des valeurs d'incertitude aux utilisateurs.

J'ai analysé le potentiel de MSG pour l'amélioration des méthodes d'estimation du rayonnement solaire. Plus particulièrement, j'ai réalisé une étude de faisabilité sur la construction d'indices d'enneuagement spectraux dérivés des données satellitales fournies par les deux canaux à bande étroite du spectre visible de MSG. Cette étude a démontré que la présence de ces deux canaux n'apporte pas de bénéfice significatif pour le développement de méthodes d'estimation du rayonnement solaire basées sur la construction d'indices d'enneuagement. Ce résultat a encouragé l'utilisation des propriétés optiques, géométriques et microphysiques des nuages, disponibles par le traitement d'images MSG, comme paramètres d'entrée pour une nouvelle méthode d'estimation du rayonnement solaire.

J'ai appliqué une méthode de fusion de données visant à améliorer la résolution spatiale de cartes climatologiques d'aérosols. La justesse de ces nouvelles cartes par rapport aux anciennes a été évaluée par comparaison avec des observations du réseau AERONET. Les comparaisons ont montré que ces nouvelles cartes sont d'une qualité équivalente aux cartes d'aérosols originales. Autrement dit, nous n'avons pas démontré que l'information sur la distribution spatiale de l'épaisseur optique des aérosols a été améliorée. Ces travaux n'apporteront donc pas une modélisation plus fine de l'éclairement par ciel clair pour la méthode Heliosat III. Néanmoins, une telle méthode de fusion de données a déjà été appliquée pour des paramètres climatologiques à échelle mondiale en apportant des résultats probants (Lefèvre *et al.* (2004). Ces travaux revêtent alors une autre dimension en démontrant l'intérêt des méthodes de fusion de données pour améliorer la résolution spatiale des cartes climatologiques de paramètres atmosphériques. Le bénéfice peut être important pour la modélisation du bilan radiatif atmosphérique à échelle globale, entrée essentielle des modèles de prévision du réchauffement climatique global. En effet, ces études sont souvent limitées par la basse résolution spatiale des cartes de paramètre atmosphérique et de surface disponibles sur la totalité de la surface terrestre.

J'ai proposé une méthode permettant de simuler une image du canal visible à large bande de Meteosat-7 à partir des images acquises par les deux canaux visibles à bande étroite de MSG. Cette simulation a permis au centre d'énergétique de mettre au point le système HelioClim-2 en attendant que la méthode Heliosat III soit totalement opérationnelle. Nous avons donc pu bénéficier de MSG pour une continuation plus performante du service fourni aux utilisateurs par HelioClim-1. Cette continuation permettra également d'anticiper la fin du programme Meteosat-7 prévu en 2005. HelioClim-2 fournit une information sur le rayonnement solaire de résolution spatiale et temporelle plus élevée que celle fournie par HelioClim-1. Elle est délivrée sur un support spatial de 5' (environ 10 km) mais sans être interpolée. Cette information est disponible sur un pas temporel horaire, contre un pas journalier pour HelioClim-1.

La continuation naturelle des systèmes HelioClim se retrouve dans le système d'information intégré contenant les résultats de la méthode Heliosat III. En bénéficiant de l'expérience acquise lors de la conception d'HelioClim-1, j'ai proposé une configuration de l'implémentation de la méthode Heliosat III dans le cadre d'une chaîne de traitement des données satellitales partagée entre le DLR et l'école des mines de Paris. Ces travaux apporteront à HelioClim-3 la mise à jour en temps réel de la base de données. Une amélioration de l'algorithme d'estimation du rayonnement restera également possible sans modifier le contenu de la base de données. HelioClim-3 représentera une réponse encore plus performante aux besoins des utilisateurs qu'HelioClim-1 et HelioClim-2. En effet, ce futur système sera en mesure de fournir les composantes directe et diffuse ainsi que la distribution spectrale du rayonnement, pour une résolution spatiale plus élevée et une résolution temporelle quart-horaire.

D'une manière générale, j'ai apporté par cette thèse une amélioration à la qualité et l'accessibilité de l'information du rayonnement solaire. J'ai participé au développement d'une climatologie du rayonnement solaire incident en onde courte en utilisant les outils d'estimation satellitales existants et les nouvelles technologies de l'information et de la communication. J'ai contribué à la continuité de cette climatologie en intégrant les bénéfices des nouveaux outils satellitales afin d'améliorer la qualité de l'information délivrée aux utilisateurs.

Plusieurs points peuvent néanmoins être exploités afin d'améliorer la qualité et l'accès à l'information sur la rayonnement solaire.

Les méthodes d'estimation du rayonnement à partir d'images satellitales peuvent être améliorées. Si la future méthode Heliosat III s'attache à mieux décrire les propriétés des nuages, les conditions climatiques et géographiques locales doivent également être prises en compte dans ces méthodes afin de réduire les incertitudes des estimations satellitales (Zelenka *et al.* 2003).

Le rayonnement solaire est difficile à cartographier dans les zones montagneuses car la forte variabilité spatiale de l'orographie échappe souvent à la précision des images issues des satellites météorologiques géostationnaires. L'apport de données orographiques de haute résolution peut réduire les incertitudes des estimations satellitales (Cros *et al.* 2004). L'irradiation est difficile à estimer au-dessus des zones enneigées, en effet la réflectance perçue par le satellite au-dessus de ce type de surface diffère peu de celle observée au-dessus des nuages les plus brillants. Là aussi, l'utilisation de données externes sous forme de cartes améliore les résultats (Perez *et al.* 2002).

Une amélioration de la couverture spatio-temporelle de l'information du rayonnement solaire consisterait à développer un système d'information aux qualités analogues aux systèmes HelioClim mais couvrant toute la surface terrestre grâce aux données de l'ensemble des satellites météorologiques opérationnels (orbites géostationnaires et polaires). Cette amélioration pourrait se concrétiser par la création d'un système d'information fournissant l'irradiation globale, directe, diffuse et la distributions spectrale du rayonnement. Cette information devra être disponible avec la plus haute résolution spatio-temporelle réalisable avec les images que peuvent fournir les satellites météorologiques actuels. Enfin, une information précise du rayonnement à échelle locale serait réalisable avec l'utilisation combinée de systèmes d'information géographique délivrant une information pertinente sur l'orographie et l'enneigement.

Le développement d'un tel système serait plus facile par une coopération internationale aboutissant à:

- la mise au point d'une plate-forme de combinaison des données des satellites météorologiques opérationnels couvrant l'ensemble de la surface terrestre,
- une cohérence et une inter-comparabilité des méthodes d'estimations satellitaires du rayonnement,
- le développement d'un système d'information coopératif diffusant les données selon des normes standards de format et d'unité.

Références bibliographiques

- AERONET (Aerosol Robotic Network) <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>
- Aiazzi B., Alparone L., Argenti F., Baronti S., 1999, Wavelet and pyramid techniques for multisensor data fusion: a performance comparison varying with scale ratios. *In Image and Signal Processing for Remote Sensing V*, S. B. Serpico, Ed, SPIE vol. 3871: 251-262.
- Anonyme, 1980, Atlas des fréquences de l'insolation journalière dans le midi méditerranéen, Institut de Mécanique de Grenoble, Equipe de recherches cartographiques appliquées au climat et à l'hydrologie.
- Anonyme, 1983, Atlas des fréquences de l'insolation journalière dans la France du Sud-Ouest, Equipe de recherches cartographiques appliquées au climat et à l'hydrologie - Université Grenoble I, Laboratoire de Géographie de l'Université de Haute Bretagne - Rennes II.
- Anonyme, 1984, Le gisement solaire en France - Recueil de données statistiques- Période 71-80, Service météorologique métropolitain, division climatologie, Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie, Ministère des Transports - Direction de la Météorologie.
- Bedel J.A., Jan J., Perarnaud V., 1980, Le gisement solaire en France - L'irradiation solaire globale reçue sur une surface horizontale, Ministère des Transports - Direction de la Météorologie.
- Bériot N., 1983, Rapport sur l'évaluation de la ressource énergétique solaire à l'aide de satellites météorologiques, Ministère des Transports - Direction de la Météorologie, France, WCP-80.
- Beyer H. G., Reise C., Wald L., Utilization of satellite data for the assessment of large scale PV grid integration. *In Proceedings of 11th Photovoltaic Solar Energy Conference*, pp. 1309-1312, Hardwood Academic Publ., Switzerland, 1992.
- Beyer H.G., Costanzo C., Heinemann D., 1996, Modifications of the Heliosat procedure for irradiance estimates from satellite images. *Solar Energy*, **56**, 3, 207-212.
- Beyer H.-G., Czeplak G., Terzenbach U., Wald L., 1997, Assessment of the method used to construct clearness index maps for the new European Solar Radiation Atlas (ESRA). *Solar Energy*, **61**, 6, 389-397.
- BSRN (Baseline Surface Radiation Network) <http://bsrn.ethz.ch/>
- Cano D., Monget J.M., Albuissou M., Guillard H., Regas N., and Wald L., 1986, A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data, *Solar Energy*, **37**, 31-39.
- Colle S., Luna de Abreu S., Couto P., Mantelli S., 1999, Distribution of solar irradiation in Brazil derived from geostationary satellite data, *In Proceedings of the Solar World Congress ISES 1999*, Jerusalem, July 4-9 1999.
- Cros S., Albuissou M., Wald L., Simulating Meteosat-7 broadband radiances at high temporal resolution using visible channels of Meteosat-8. Submitted to *Geophysical Research Letters*, January 2004.
- Cros S., Wald L., 2003. Survey of the main databases providing solar radiation data at ground level. *In Proceedings of the 23rd EARSeL Annual Symposium "Remote Sensing in Transition"*, 2-4 June 2003, Ghent, Belgium, Rudi Goossens editor, Milpress, Rotterdam, Netherlands, pp. 491-497.
- Delorme C., Gallo A., and Olivieri J., 1992, Quick use of Wefax images from Meteosat to determine daily solar radiation in France, *Solar Energy*, **49** (3), 191-197.
- Diabaté L., Demarcq H., Michaud-Regas N., Wald L., 1988, Estimating incident solar radiation at the surface from images of the Earth transmitted by geostationary satellites : the Heliosat Project, *International Journal of Solar Energy*, **5**, 261-278.
- Diabaté L., Moussu G., Wald L., 1989, Description of an operational tool for determining global solar radiation at ground using geostationary satellite images, *Solar Energy*, **42**, 201-207.

- Diabaté L., Wald L., 1995, An attempt to estimate the diffuse component of solar radiation on horizontal plane from satellite images. *African Journal of Science and Technology*, 11, 1, 39-44.
- DLR – DFD (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) <http://www.dfd.dlr.de>
- Dribssa E., Coglian E., Lavagno E., Petrarca S., 1999, A modification of the Heliosat method to improve its performance, *Solar Energy*, 65 (6), 369-377.
- Dutilleul, P., 1989, An implementation of the “algorithme à trous” to compute the wavelet transform. In: Combes, J.M, Grossman, A., Tchamitchian, Ph. (Eds.), *Wavelets: Time-Frequency Methods and Phase Space*. Springer, Berlin, pp. 298-304.
- Erbs D.G., Klein S.A., Duffie J.A., 1982, Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly average global radiation, *Solar Energy*, 28, (4), 293-302.
- ESRA (European Solar Radiation Atlas), 2000, Fourth edition, incluant CD-ROM. Edité par J. Greif, K. Scharmer. Examineurs scientifiques : Dogniaux R., Page J. Auteurs : Wald L., Albuisson M., Czeplak G., Bourges B., Aguiar R., Lund H., Joukoff A., Terzenbach U., Beyer H. G., Borisenko E. P.. Publié pour la Commission de la Communauté Européenne par les Presses de l'Ecole, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Paris, France.
- EUMETSAT, 1998, 2003, <http://www.eumetsat.de>
- Fontoynt M., Dumortier D., Heinemann D., Hammer A., Olseth J., Skartveit A., Ineichen P., Reise C., Page J., Roche L., Beyer H.G., Wald L., 1998, Satel-Light: a WWW server which provides high quality daylight and solar radiation data for Western and Central Europe, In *Proceedings of the 9th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography*. Published by Eumetsat, Darmstadt, Germany, EUM P 22, 434-435. <http://www.satellight.com>
- Frémy D. et M., 2000, *Quid 2001*, Editions Robert Laffont S.A.
- Geiger M., Diabaté L., Ménard L., Wald L., 2003, A web service for controlling the quality of measurements of global solar irradiation. *To be published by Solar Energy*.
- Govaerts Y.M., Arriaga A., Schmets J., 2001, Operational vicarious calibration of the MSG/SEVIRI solar channels, *Advances Space Research*, 28, 21-30.
- Govaerts Y.M., Pinty B., Verstraete M.M., Schmets J., 1998, Exploitation of angular signatures to calibrate geostationary satellite solar channels, In *proceedings of the IGARSS'98 conference*, 6-10 juillet 1998, Seattle, USA, 1, 327-329.
- Grau J., Torres R., Massons J., 2002, Drift in the Meteosat-7 VIS channel calibration, *International Journal of Remote Sensing*, 23 (24) pp. 5277-5282.
- Grenier J.C., de la Casinière A., Cabot T., 1994, A spectral model of Linke's turbidity factor and its experimental implications, *Solar Energy*, 52 (4), 303-313.
- Grüter W., Guillard H., Möser W., Monget J.M., Palz W., Raschke E., Reinhardt R.E., Schwarzmann P., Wald L., 1986, *Solar Radiation Data from Satellite Images*, Solar Energy R&D in the European Community, Serie F, Volume 4, D. Reidel Publishing Company, 100 p.
- Guyot G., 1999, *Climatologie de l'Environnement*, Seconde édition, Dunod, Paris, 544 pp.
- Hammer A., 2000, *Anwendungsspezifische Solarstrahlungsinformationen aus Meteo-Daten*. Thèse de doctorat, Département de physique, université Carl-von-Ossietzky, Oldenburg, Allemagne.
- Hay J.E., 1981, The mesoscale distribution of solar radiation at the Earth's surface and the ability of satellites to resolve it, In *Proceedings of the First Workshop on Terrestrial Solar Resource Forecasting and on Use of Satellites for Terrestrial Solar Resource Assessment*, Washington D.C., February 2-5 1981.
- Hay J.E., Hanson K.J., 1985, Evaluating the solar resource: a review of problems resulting from temporal, spatial and angular variations, *Solar Energy*, 34, 151-161.

- Heidt F.D., Teichmann C., Büchler P., Schulze-Kegel D., 1998, Satellite-based solar radiation data go Internet, *In Proceedings of the second ISES-Europe Solar Congress, EuroSun'98*.
- Heinemann, D., Beyer H-G, Hammer A, Hoyer C., Lorenz E., 2001, Satellite-Based Techniques for the Retrieval of Solar Radiation Data – A Review of Current European Activities. *In Proc. ISES Solar World Congress, 25-30 November 2001, Adelaide*.
- HelioClim. <http://www.helioclim.net>
- INFEO. Information on Earth Observation. <http://www.infeo.org>
- ISCCP. International Satellite Cloud Climatology Project Data. Monthly Cloud Products: July 1983 – December 1988 and January 1989 – December 1993. CD-ROM ISCCP D2, available at NASA Langley Distributed Active Archive Center, Hampton, Virginia, USA. <http://www.cira.colostate.edu/climate/isccp/jisccp2/jisccp2.htm>
- Kassem A.S., Mujahid A.M., Turner D.W., 1993, Yearly, seasonal and monthly daily average diffuse sky radiation models, *Arab Gulf J. Scient. Res.* 11(3), 351-364.
- Kleih M., Best C., van Gulik D., 1998, HTTP Geotemporal Search Protocol in *Proceedings of the Earth Observation & Geo-Spatial Web and Internet Workshop '98: Salzburger Geographische Materialien*, Volume 27. Instituts für Geographie der Universität Salzburg. ISBN: 3-85283-014-1.
- Koepke, P., M. Hess, I. Schult, and E.P. Shettle (1997): *Global Aerosol Data Set*, Report No. 243, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, ISSN 0937-1060.
- Kriebel K.T., 1981, Calibration of the Meteosat visible channel by airborne measurements, *Journal of Applied Optics*, 20 (1), 11-12.
- Kriebel K.T., Amann V., 1993, Vicarious calibration of the Meteosat Visible channel, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 10 (2), 225-232.
- Kriebel K.T., Mannstein H., Amann V., 1996, Absolute calibration of the Meteosat-5 visible channels. *In Proceedings of the 1996 Meteorological Satellite Data Users' Conference*, EUM P 19, Publié par EUMETSAT, Darmstadt, 31-40.
- Kriebel, K., Gesell G., 1989. Optical Properties of Clouds Derived from Fully Cloudy AVHRR Pixels. *Beitraege zur Physik der Atmosphaere*, 62, 165-171.
- Lefèvre M., Albuissou M., Ranchin T., Wald L., Remund J., 2004. Fusing ground measurements and satellite-derived products for the construction of climatological maps in atmosphere optics. *In Proceedings of the 23rd EARSeL Annual Symposium "Remote Sensing in Transition"*, 2-4 June 2003, Ghent, Belgium, Rudi Goossens editor, Milpress, Rotterdam, Netherlands, pp. 85-91.
- Lefèvre M., Albuissou M., Remund J., Wald L., 2002, Study of effective distances for interpolation schemes in meteorology. 27th Annual Assembly, European Geophysical Society, Nice, April 2002, *Geophysical Research Abstracts*, vol. 4, EGS02-A-03429.
- Lefèvre M., Bauer O., Iehle A., Wald L., 2000. An automatic method for the calibration of time-series of Meteosat images. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 5, 1025-1045.
- Lefèvre M., Rigollier C., Cros S., Wald L., 2003, Toward a solar climatological database: the HelioClim project, *In Proceedings of the EARSeL conference: Geoinformation for European wide integration*, June 4-6 2002, Prague, Czech Republic.
- LibRadtran, 2002, <http://www.libradtran.org/>
- Linke F., 1922, Transmission-Koeffizient und Trübungsfaktor, *Beiträge zur Physik der Freien Atmosphäre*, 10 (2/3), 91-103.
- Liou, K.N., 1980: *An Introduction to Atmospheric Radiation*, Academic Press, New York, 392 pp.
- Louche A., Peri G., Iqbal M., 1986, An analysis of Linke turbidity factor, *Solar Energy*, 37 (6), 393-396.

- Mallat, S.G., 1989. A theory for multiresolution signal decomposition : the wavelet representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 11 (7) 674-693.
- MARS Global Radiation Database Point Timeseries. <http://www.soda-is.com/>
- Meteonorm, 2000, Remund J., Kunz S., Lang R., *Meteonorm version 4.0, Global meteorological database for solar energy and applied climatology*, Nova Energie GmbH, Schachenallee 29, CH-5000 Aarau, Switzerland.
- Meteosat Collection. CD-ROMs available at European Space Agency, Paris, France
- Möser W., Raschke E., 1983, Mapping of global radiation and of cloudiness from Meteosat image data: theory and ground truth comparisons, *Meteorologische Rundschau*, **36**, 33-41.
- Möser W., Raschke E., 1984, Incident solar radiation over Europe estimated from Meteosat data, *Journal of Applied Meteorology*, **23**, 166-170.
- Müller R.W., Dagestad K.F., Ineichen P., Schroedter M., Cros S., Dumortier D., Kuhlemann R., Olseth J.A., Piernavieja G., Reise C., Wald L., Heinemann D., 2004, Rethinking satellite based solar irradiance modelling - The SOLIS clear sky module. *Remote Sensing of Environment*, **91**, 160-174.
- Nakajima, T., King, M., 1990. Determination of the optical thickness and effective particle radius of clouds from reflected solar radiation measurements. Part I: Theory. *Journal of the Atmospheric Sciences* **47** (15).
- NASA-SRB. First WCRP Surface Radiation Budget Global Data Sets. Shortwave Radiation Parameters March 1985 – December 1988. CD-ROM, version 1.1, disponible au NASA Langley Distributed Active Archive Center, Hampton, Virginia, USA.
- Noia M., Ratto C. F., Festa R., Solar irradiance estimation from geostationary satellite data: II. Physical models. *Solar Energy*, **51**, 457-465, 1993.
- NREL-NSRDB National Renewable Energy Laboratory, National Solar Radiation Database <http://rredc.nrel.gov/solar>
- Page, J. K., The estimation of diffuse and beam irradiance and diffuse and beam illuminance from daily global irradiation, a key process in the evolution of microcomputer packages for the new European Solar Radiation and Daylighting Atlases. ESRA Project No. J0U2-CT-94-0305/P0603, Task II Coordinator's Technical Report No. 8 (prepared June 30th, 1995 and revised Aug. 6th, 1995), 37 pp. + 5 pp. of tables. Appendix 1 : Solar elevation functions for estimating cloudless day beam irradiance and daily beam irradiation on horizontal surfaces from the beam transmittance, 12 pp. + 5 pp. of tables. Unpublished note, available from Professor J. Page, University of Sheffield, England, 1995.
- Pastre C., 1981, Développement d'une méthode de détermination du rayonnement solaire global à partir des données Meteosat, *La Météorologie*, VI^e série N°24, mars 1981.
- Perez R., Ineichen P., Maxwell E., Seals R., and Zelenka A., 1992, Dynamic global-to-direct irradiance conversion models, *ASHRAE Transactions*, **98**, p. 3578.
- Perez R., Ineichen P., Moore K., Kmiecik M., Chain C., George R., Vignola F., 2002, A new operational model for satellite-derived irradiances description and validation, *Solar Energy*, **73** (5), 307-317.
- Perez R., Seals R., Zelenka A., 1997, Comparing satellite remote sensing and ground network measurements for the production of site/time specific irradiance data, *Solar Energy*, **60**, 89-96.
- Perrin de Brichambaut C. and Vauge C., 1982, Le gisement solaire: évaluation de la ressource énergétique. Technique et Documentation (Lavoisier), Paris, France, 222 pp.
- Pinker R.T., Laszlo I., 1991, Effects of spatial sampling of satellite data on derived surface solar irradiance, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **8**, 96-107.

- Ranchin T., Aiazzi B., Alparone L., Baronti S., Wald L., 2003. Image fusion. The ARSIS concept and some successful implementation schemes. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 58, 4-18.
- Ranchin T., Wald L., 2000. Fusion of high spatial and spectral resolution images: the ARSIS concept and its implementation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66(1), 49-61.
- Raschke E., Stuhlmann R., Palz W., Steemers T.C., 1991, *Solar Radiation Atlas of Africa*, A.A. Balkema Ed., Rotterdam, Brookfield.
- Reise, C., 1996. Minutes of the 1st Satellight "Industrial Meeting". December, 1996, 6 pp.
- Remund J., Wald L., Page, J., 2003. Chain of algorithms to calculate advanced radiation parameters. In *Proceedings of ISES Solar World Congress*, 16-19 June, Göteborg, Sweden, in press.
- RETScreen, 2000, <http://retscreen.gc.ca>
- Ricchiazzi P., Yang S., Gautier C., Sowle D., 1998, SBDART: A research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the earth's atmosphere, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 2101-2114.
- Rigollier C., 2000, Vers un accès à une climatologie du rayonnement solaire : estimation de l'irradiation globale à partir d'images satellitales. Thèse de Doctorat en Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication, Université Nice – Sophia Antipolis, France, 194 p.
- Rigollier C., Albuissou M., Delamare C., Dumortier D., Fontoynt M., Gaboardi E., Gallino S., Heinemann D., Kleih M., Kunz S., Levermore G., Major G., Martinoli M., Page J., Ratto C., Reise C., Remund J., Rimoczi-Paal A., Wald L., Webb A., 2000 a, Exploitation of distributed solar radiation databases through a smart network: the project SoDa, EuroSun 2000, June 18-22 2000, Copenhagen, Denmark.
- Rigollier C., Bauer O., Wald L., 2000 b, On the clear sky model of the 4th European Solar Radiation Atlas with respect to the Heliosat method, *Solar Energy*, 68 (1), 33-48.
- Rigollier C., Lefèvre M., Blanc Ph., Wald L., 2002. The operational calibration of images taken in the visible channel of the Meteosat-series of satellites. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(9), 1285-1293.
- Rigollier C., Lefèvre M., Cros S., Wald L., 2003, Heliosat 2 : an improved method for the mapping of the solar radiation from Meteosat imagery, In *Proceedings of the 2002 Eumetsat Meteorological Satellite Conference*, Dublin, Ireland.
- Rigollier C., Lefèvre M., Wald L., 2004, The method Heliosat-2 for deriving shortwave solar radiation from satellite images. *Solar Energy*, in press
- Rigollier C., Wald L., 1998, Towards operational mapping of solar radiation from Meteosat images, In *Proceedings of the EARSeL conference: Operational remote sensing for sustainable development*, May 11 -14 mai, Enschede, The Netherlands.
- Satel-Light. <http://www.satel-light.com/>
- SATMOS, Service d'Archivage et de Traitement Météorologique des Observations Spatiales, Météo-France, <http://www.satmos.meteo.fr>
- Saunders, R., Kriebel, K., 1988, An improved method for detecting clear sky and cloudy radiances from AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 9, 123-150.
- Schiffer R.A., Rossow W.B., 1983, The International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP) : The first project of the World Climate Research Programme, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 64, 779-784.
- Schiffer R.A., Rossow W.B., 1985, ISCCP global radiance data set: A new resource for climate research, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 66, 1498-1503.
- Skartveit A., Olseth J.A., Tuft M.E., 1998, An hourly diffuse fraction model with correction for variability and surface albedo, *Solar Energy*, 63, 173-183.

- SoDa (Integration and exploitation of networked Solar radiation Database for environnement Monitoring) <http://www.soda-is.org>
- Solar Radiation Atlas of Africa*, 1991, Edited by E. Raschke, R. Stuhlmann, W. Palz, T. C. Steemers, Published for the Commission of the European Communities by A. Balkema, Rotterdam, 155 p.
- | | | | |
|-----|---------|-----------|--------|
| SRB | Surface | Radiation | Budget |
|-----|---------|-----------|--------|
- http://charm.larc.nasa.gov/GUIDE/campaign_documents/srb_project.html
- Starck J-L., Murtagh F., 1994, Image restoration with noise suppression using the wavelet transform. *Astronomy Astrophysics*, Vol. 288: 342-350.
- Stuhlmann R., Rieland M., Raschke E., 1990, An improvement of the IGMK model to derive total and diffuse solar radiation at the surface from satellite data, *Journal of Applied Meteorology*, **29**, 596-603.
- Sun and Climate (Soleil et Climat)*, 1980, CNES, CNRS, DGRST, Journées d'études internationales, Toulouse, 30 septembre - 3 octobre 1980.
- Supit I., 1994, *Global radiation*. Agriculture series, EUR 15745, European Commission, Office for Official Publications, Luxembourg, 194 p.
- TerrainBase 1998, cédérom disponible au *National Geophysical Data Center*, Boulder Colorado, USA
- Thompson R., Perry A., Eds, *Applied Climatology - Principles and Practice*. London: Routledge, 1997, 352 pp.
- Triplet J-P., Roche G., 1986, *Météorologie Générale*, Troisième édition, Ecole Nationale de la Météorologie. 317pp.
- Troen, Peterson E.L., 1989, *European Wind Atlas*. Publié pour la commission des communautés européennes par le laboratoire national de Riso, Roskilde, Denmark, 656 pp.
- Vigneau J-P., 2000, "Géoclimatologie", Ellipses éditions, Paris, 288 pp.
- Wald L., 2002. *Data Fusion. Definitions and Architectures - Fusion of Images of Different Spatial Resolutions*. Presses de l'Ecole, Ecole des Mines de Paris, Paris, France, ISBN 2-911762-38-X, 200 pp.
- Wald L., Albuissou M., Best C., Delamare C., Dumortier D., Gaboardi E., Hammer A., Heinemann D., Kift R., Kunz S., Lefèvre M., Leroy S., Martinoli M., Ménard L., Page J., Prager T., Ratto C., Reise C., Remund J., Rimoczi-Paal A., Van der Goot E., Vanroy F., and Webb A., 2004. SoDa: a Web service on solar radiation. In *Proceedings of Eurosun 2004*, published by PSE GmbH, Freiburg, Germany, pp. (3)921-927.
- Wald L., Albuissou M., Best C., Delamare C., Dumortier D., Gaboardi E., Hammer A., Heinemann D., Kift R., Kunz S., Lefèvre M., Leroy S., Martinoli M., Ménard L., Page J., Prager T., Ratto C., Reise C., Remund J., Rimoczi-Paal A., Van der Goot E., Vanroy F., and Webb A., 2002, SoDa: a project for the integration and exploitation of networked solar radiation databases. In: *Environmental Communication in the Information Society*, W. Pillmann, K. Tochtermann Eds, Part 2, pp. 713-720. Publié par la Société Internationale pour la Protection de l'Environnement, Vienne, Autriche.
- Wald L., Ranchin T., 2003, The ARSIS concept in image fusion: an answer to users needs. In *Proceedings of the 6th International Conference on Information Fusion*, Cairns, Australia, 8-11 July 2003, pp. 181-184.
- Wald L., Wald J.-L., Moussu G., 1992, A technical note on a low-cost high-quality system for the acquisition and digital processing of images of WEFAX type provided by meteorological geostationary satellites. *International Journal of Remote Sensing*, **13**, 5, 911-916.
- WMO – WRDC World Radiation Data Center. http://wrdc.mgo.rssi.ru/Lefts_en.htm
- WMO-GCOS World Meteorological Organization-Global Climate Observing System <http://www.wmo.ch/web/gcos/gcoshome.html>

WMO-WWW World Meteorological Organization-World Weather Watch
<http://www.wmo.ch/web/www.www.html>

World Meteorological Organization (WMO), 1981, Meteorological aspects of the utilization of solar radiation as an energy source. Annex: World maps of relative global radiation. Technical Note N° 172, WMO-N° 557, Geneva, Switzerland, 298 pp.

Zelenka A., 1994, Combining Meteosat and surface network data: a data fusion approach for mapping solar irradiation. In Proceedings of the 10th Meteosat Scientific Users' Conference, Locarno Switzerland, 1994, published by Eumetsat, Darmstadt, Germany, 515-520.

Zelenka A., Czeplak G., d'Agostino V., Josefson W., Maxwell E., Perez R., 1992, Techniques for supplementing solar radiation network data, Technical Report, International Energy Agency, # IEA-SHCP-9D-1, Swiss Meteorological Institute, Krahbuhlstrasse, 58, CH-8044 Zurich, Switzerland.

Zelenka A., Perez R., Renné D., 2003, Achievable ground-truthing accuracy of satellite-derived hourly global irradiance, In Proceedings of the 3rd Workshop on satellites-for-Solar-Energy, Les Marécottes, Switzerland, March 19-21, 2003.

Zelenka A., Perez R., Seals R., and Renné D., 1999, Effective accuracy of satellite-derived hourly irradiances, *Theoretical and Applied Climatology*, **62**, 199-207.

Annexe I

SOLIS *ciel clair*

Rethinking satellite based solar irradiance modelling

- The SOLIS clear-sky module -

R.W. Mueller ^{a,*}, K.F. Dagestad ^c, P. Ineichen ^d,
M. Schroedter-Homscheidt ^e, S. Cros ^f, D. Dumortier ^g,
R. Kuhlemann ^b, J.A. Olseth ^c, G. Piernavieja ^h, C. Reise ⁱ, L. Wald ^f,
D. Heinemann ^b

^a*University of Oldenburg, now at Deutscher Wetterdienst, Offenbach*

^b*University of Oldenburg*

^c*University of Bergen, Norway*

^d*University of Geneva, Switzerland*

^e*German Aerospace Center - German Remote Sensing Data Center (DLR-DFD)*

^f*Ecole des Mines de Paris, France*

^g*Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, France*

^h*Instituto Tecnológico de Canarias, Spain*

ⁱ*Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, Germany*

Abstract

Accurate solar irradiance data are not only of particular importance for the assessment of the radiative forcing of the climate system, but also absolutely necessary for efficient planning and operation of solar energy systems. Within the European project Heliosat-3 a new type of solar irradiance scheme is developed. This new type will be based on radiative transfer models (RTM) using atmospheric parameter information retrieved from the MSG satellite (clouds, ozone, water vapour) and the ERS-2/ENVISAT satellites (aerosols, ozone).

This paper focuses on the description of the clear-sky module of the new scheme, especially on the integrated use of a radiative transfer model. The linkage of the clear-sky module with the cloud module is also briefly described in order to point out the benefits of the integrated RTM use for the all-sky situations. The integrated use of a RTM within the new SOLAR Irradiance Scheme SOLIS is applied by introducing a new fitting function called the modified Lambert-Beer (MLB) relation. Consequently, the modified Lambert-Beer relation and its role for an integrated RTM use are discussed. Comparisons of the calculated clear-sky irradiances with ground-based measurements and the current clear-sky module demonstrate the advantages and benefits of SOLIS. Since SOLIS can provide spectrally resolved irradiance data, it can be used for different applications. Beside improved information for the planning of solar energy systems, the calculation of photosynthetic active radiation, UV-index and illuminance is possible.

1 INTRODUCTION

Satellite based Remote Sensing is a central issue in monitoring and forecasting the state of the earth's atmosphere. Geostationary satellites such as METEOSAT or GOES provide cloud information in a high spatial and temporal resolution. These satellites are, therefore, not only useful for weather forecasting, but also for the estimation of solar irradiance, since the knowledge of the radiance reflected by clouds is the basis for the calculation of the transmitted irradiance. Additionally, a detailed knowledge about atmospheric parameters involved in scattering and absorption of sunlight is a further necessity. An accurate estimation of the downward solar irradiance is not only of particular importance for assessing the radiative forcing of the climate system, but also absolutely necessary for an efficient planning and operation of solar energy systems and the estimation of the energy load. Solar resource assessment from geostationary satellites constitutes a powerful alternative to a meteorological ground network for both climatological and operational data (Perez et al., 1998a).

Solar irradiance schemes provide accurate solar irradiance data with a high spatial and temporal resolution using weather satellites such as METEOSAT and MSG. Currently, most of the operational calculation schemes for solar irradiance are semi-empirical and based on statistical methods. They use cloud information from the current METEOSAT or GOES satellite and climatologies of atmospheric parameters, e.g. turbidity (characterising the combined effect of aerosols and water-vapour), see Perez et al. (2001) and references therein. The Heliosat method (Cano et al., 1986) and (Beyer et al., 2003) is certainly one of the best known. It converts METEOSAT satellite data into irradiance with a better accuracy than interpolated ground measurements could provide (Zelenka et al., 1999) and (Perez et al., 1998b). It is applied routinely in real time at the University of Oldenburg since 1995. It has permitted the establishment of the server Satel-Light, which delivers valuable information on daylight in buildings to architects and other stakeholders (Fontoynt et al., 1997). It has also been used within the SoDa project ¹ (Wald et al., 2002) for the calculation of the solar irradiance. Furthermore there exists derivatives of Heliosat, e.g. Heliosat-2 (Lefèvre et al., 2002), which is optimised as an operational processing chain for climatological data. With the launch of the Meteosat Second

* Corresponding author.

Email address: richard.mueller@dwd.de (R.W. Mueller).

¹ Integration and exploitation of networked SOLar radiation DAtabases for environment monitoring project.

Generation (MSG) satellite the possibilities for monitoring the earth atmosphere have improved enormously. The MSG satellite will not only provide higher spatial (1km) and temporal (15 minutes) resolution, but also offers with its 11 channels from 0.6 to 13 μm the potential for the retrieval of atmospheric parameters such as additional cloud parameters, ozone, water-vapour column, and with restrictions aerosols. These capabilities plus the synergy with other sensors, such as those aboard ERS-2 and ENVISAT (GOME/ATSR-2 and SCIAMACHY/AATSR), permit us to attain a refinement in the solar irradiance modelling. These refinements necessitate a rethinking of satellite based solar irradiance modelling and going ahead with a drastic revision of the current Heliosat processing scheme. The current Heliosat scheme cannot exploit enhanced information about the atmosphere provided by improved satellite capabilities. Thus, it was necessary to develop a new scheme, which will be able to exhaust the enhanced capabilities of MSG (SEVIRI) and ENVISAT (SCIAMACHY). The accuracy of the calculated irradiance is expected to increase significantly with a scheme that can exhaust the capabilities of the new satellites. The new calculation scheme has to be fast, accurate and should provide - in contrast to Heliosat and Heliosat-2 - spectrally resolved solar irradiance data.

As a consequence of the things mentioned above, the new scheme is based on the integrated use of a radiative transfer model (RTM), whereas the information of the atmospheric parameters retrieved from the MSG satellite (clouds, ozone, water-vapour) and from the GOME/ATSR-2 instruments aboard the ERS-2 satellites (aerosols, ozone) will be used as input to the RTM based scheme.² The direct integration of a RTM into the calculation schemes - instead of using pre-calculated look-up tables - is only possible if the necessary computing time can be kept small. For this purpose a functional treatment of the diurnal solar irradiance variation is applied, allowing an appropriate operational use of a RTM within the calculation scheme. This paper focuses on the description of the new clear-sky module, especially on the integrated use of the radiative transfer model (section 2). The linkage of the clear-sky module with the cloud module is briefly described in order to point out the benefits of the integrated RTM use for all-sky situations as well.

² In the near future the information from GOME/ATSR-2 will be replaced by SCIAMACHY/AATSR on ENVISAT.

Table 1
Improvements in METEOSAT resolution

	spatial resolution	temporal resolution	spectral channels
MSG :: METEOSAT	1 / 3 km :: 2.5 / 5 km	15 min :: 30 min	12 :: 3

2 SOLIS - THE NEW SCHEME

2.1 Overview

The integrated usage of the RTM within the scheme is related to the clear-sky scheme using the well established n - k relation of the Heliosat method (Cano et al., 1986) and (Beyer et al., 1996) or the Cloud Optical Depth (COD) option to consider cloud effects. It is important to note that the integrated use of the RTM within the clear sky module is linked with an enormous improvement for all-sky situations as well. It is not a restriction of the model. This issue will be discussed in more detail in section 5.1. On the other hand, the benefits and needs of the described clear-sky module can only be understood if it is seen in the context of its main purpose – the operational satellite based solar irradiance modelling with a large geographical coverage. Keeping this in mind, it is also necessary to describe briefly the treatment of the clouds and the basics of the linkage between the clear-sky module -described in detail in this paper- and the cloud modules, which are partly still under development. The cloud modules will be discussed in more detail in a forthcoming paper after reliable MSG data will be available.

Using n - k relation:

The Heliosat method was originally proposed by Cano et al. (1986) and later modified by Beyer et al. (1996) and Hammer (2000). The basic idea of the Heliosat method is a two step approach. In a first step a relative normalised cloud reflectivity – the cloud index – is derived from METEOSAT images. The derived cloud index is correlated to the clear-sky index k , which relates the actual ground irradiance G to the irradiance of the cloud free case $G_{clearsky}$. Consequently, in addition to the cloud index derived from the satellite signal, a clear-sky model, providing $G_{clearsky}$, is necessary for the estimation of the actual ground irradiance.

The n - k relation is powerful, validated and leads to small Root Mean Square Deviation (RMSD) between measured and calculated solar irradiance for almost homogeneous cloud situations (RRMSD of 13-15 % for hourly values (Hammer, 2000)). With MSG data it can be expected that the treatment of clouds using the current n - k will be improved only due to the higher spatial and temporal resolution.

Using COD based code:

Within this option the information of the cloud optical depth (COD) is used to consider the cloud effect. The COD will be retrieved operationally from MSG with software from the German Aerospace Center (DLR), based on the Apollo (Kriebel and Gesell, 1989) and (Saunders and Kriebel, 1988) or Nakajima (Nakajima and King, 1990) method. The RTM model SBDART (Ricchiazzi et al., 1998) has been used to find a parameterisation in order to relate the all-sky irradiance to the clear-sky irradiance. Within this parameterisation, the effective cloud-particle radii, derivable with the Nakajima and King (1990) based scheme can also be used.

The derived parametrisation needs some fine-tuning and has to be tested with MSG data. It will be discussed in more detail in a forthcoming paper.

Regardless of the treatment of clouds, the basis for the calculation of the all-sky radiation is the clear-sky module, which is described in detail in the next section.

2.2 Basic considerations

MSG will scan the atmosphere with a very high spatial resolution (see Table 1, e.g. approximately 2.5 million pixels have to be processed every 15 min. for Europe). Thus, the computing time necessary to calculate the solar irradiance for each pixel has to be very small to make an operational usage of the solar irradiance scheme possible.

Instead of using look-up tables a new, more powerful and flexible method, the integrated use of RTM within the scheme based on a modified Lambert-Beer relation, will be applied. The integration of a RTM into the calculation schemes, instead of using pre-calculated look-up tables, is only possible if the necessary computing time can be decreased enormously. For this purpose, a functional treatment of the diurnal solar irradiance variation was applied, making an appropriate explicit operational use of a RTM within the calculation schemes possible.

Starting point of the integrated use is the assumption that daily values of the atmospheric clear-sky parameters in a spatial resolution of 100x100 km or 50x50 km are sufficient. This assumption is reasonable for solar energy applications in consideration of accuracy and operational practicality, because:

- Daily values of water-vapour and aerosols are linked with a great improvement compared to the current implicit use of a monthly turbidity climatology or aerosol and water-vapour climatologies.
- Current restrictions in the art of retrieval limit the available input with respect to the temporal and spatial resolution of the atmospheric clear-sky parameters. For example, the retrieval of aerosols from satellites is handicapped by the small aerosol reflectance and the perturbation of the weak signal by clouds and surface reflection. Also the retrieval of water-vapour is not possible for cloudy pixels. For these reasons, retrieval of daily values in 50x50 km resolution with a “global” coverage in an appropriate accuracy would be a great improvement. The effect of ozone is small compared to that of aerosols and water vapour, therefore, daily ozone values are sufficient.
- The temporal daily fluctuations of solar irradiance are generally dominated by cloud fluctuations. The cloud information is used in MSG pixel resolution (see Table 1), hence in a high temporal and spatial resolution.
- The usage of the modified Lambert-Beer function, described in section 2.5, should enable the correction of derivations from the daily values of the clear-sky irradi-

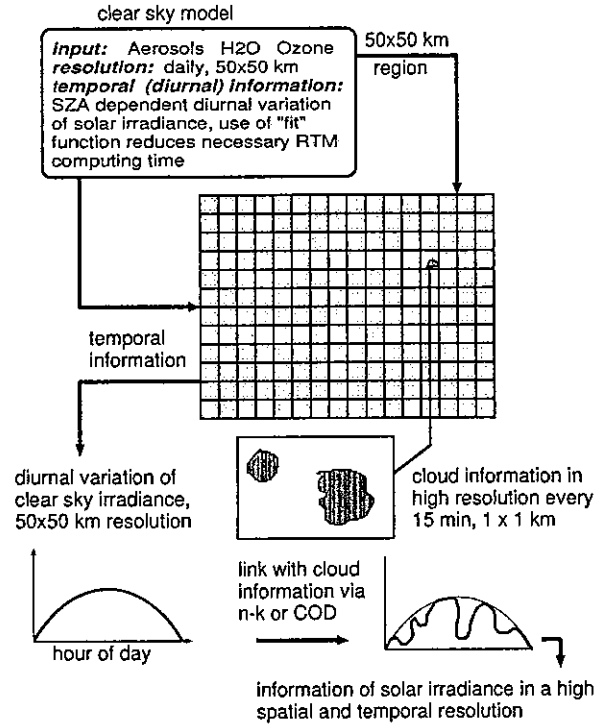


Fig. 1. Diagram of the spatial and temporal linkage between clear-sky and cloud information.

ance in an easy and fast manner (see section 2.5).

Using daily values of the atmospheric parameters (O_3 , $H_2O_{(g)}$, aerosols) within a region of 100x100 km (50x50 km) and the modified Lambert-Beer function, only two RTM calculations are necessary to define the complete diurnal variation of the clear sky irradiance for a given atmospheric state, see figure 1. The effect of clouds on the clear sky irradiance is considered by using the $n-k$ relation or the COD option (section 2.1). By this way the cloud effect is considered in MSG pixel resolution, whereby no additional explicit RTM runs are needed. Figure 1 illustrates the new scheme and the integrated use of the RTM within the clear-sky scheme. The modified Lambert-Beer (MLB) function is discussed in detail in the next section.

2.3 The Modified Lambert-Beer function

The Lambert-Beer relation is given by

$$I = I_0 * \exp(-\tau) \quad (1)$$

where τ is the optical depth and within the scope of atmospheric radiation, I is the direct radiation at ground with sun in zenith, I_0 is the extraterrestrial irradiance. Consideration of path prolongation and projection to the earth surface leads to equation 2, where θ_z is the solar zenith angle (SZA) and $I(\theta_z)$ is the irradiance at θ_z .

$$I(\theta_z) = I_0 * \exp\left(\frac{-\tau}{\cos(\theta_z)}\right) * \cos(\theta_z) \quad (2)$$

This formula describes the behaviour of the direct monochromatic radiation in the atmosphere. Transformation of equation 2 leads to the optical depth τ

$$\tau = -\ln\left(\frac{I(\theta_z)}{I_0 * \cos(\theta_z)}\right) * \cos(\theta_z) \quad (3)$$

In order to apply the Lambert-Beer relation to wavelength bands of direct irradiance, the above Lambert-Beer relation (equation 2) has to be applied in a modified manner, using a two step approach.

In a first step, the "vertical" optical depth τ_0 is calculated at a SZA of zero degree ($\theta_z = 0$), using equation 4, which is a special case of equation 3.

$$\tau_0 = -\ln\left(\frac{I(\theta_z = 0)}{I_0}\right) \quad (4)$$

In a second step, a correction of τ_0 , or equivalent to this, of the parameter $\frac{\tau_0}{\cos(\theta_z)}$ is performed, leading to the so called modified Lambert-Beer relation (MLB).

$$I(\theta_z) = I_0 * \exp\left(\frac{-\tau_0}{\cos^a(\theta_z)}\right) * \cos(\theta_z) \quad (5)$$

The correction parameter a is calculated at a SZA of 60 degree.

The modified Lambert-Beer relation (equation 5) cannot only be applied to wavelength bands for direct irradiance, but also to wavelength bands of global and diffuse irradiance. Yet, in order to apply the modified Lambert-Beer relation to global and diffuse irradiance the following things have to be considered. At low visibilities (high optical depth, high aerosol load), I_0 in equation 5 and 4 has to be enhanced for global and diffuse radiation. A general equation has been developed which is applied to I_0 to get $I_{0,enh}$.

$$I_{0,enh} = \left(1 + I_0 \cdot \frac{I_{diffuse}}{I_{direct} \cdot I_{global}}\right) \cdot I_0 \quad (6)$$

In order to avoid switching between I_0 and $I_{0,enh}$, $I_{0,enh}$ is always used instead of I_0 in equation 4 and 5 for diffuse and global irradiance.

Additionally, for diffuse irradiance the multiplication with $\cos(\theta_z)$ in equation 3 has to be skipped for diffuse irradiance, since consideration of the projection to the earth surface is no longer feasible.

It is important to notice that:

- $I(\theta_z)$ in equation 4 and 5 stands either for global, direct, or diffuse irradiance at the given SZA.
- The fitting parameter a has different values for direct, global, and diffuse irradiance.
- τ_0 is always calculated at a SZA of zero and the correction parameter a at a SZA of 60 degree, independent whether the MLB relation (equation 5) is applied to global, direct or diffuse irradiance.

Using the Modified Lambert-Beer (MLB) relation, the calculated direct and global radiation can be reproduced very well (see Fig. 2).

General remarks

The usage of the modified Lambert-Beer function is physically motivated, but it is actually a fitting function. This is especially obvious for the case of diffuse radiation. In principle, it is possible to fit the RTM calculations with any appropriate function, for example, a modified polynomial of third or higher degree ($e \cdot \cos^3(x) + f \cdot \cos^2(x) + g$). Hence the big advantage of the modified Lambert-Beer function is not the feasibility to fit the RTM calculations, but that it is possible to yield a very good match between fitted and calculated values by using only two SZA calculations (e.g. better match than obtained with a polynomial of third degree). This is possible since the change of the irradiance with SZA is related to the Lambert-Beer law, hence using the modified Lambert-Beer relation ‘‘the degrees of freedom can be reduced’’. Moreover, the parameters a can be calculated without the need for a numerical fit, respectively.

The function was tested for many different atmospheric states, e.g. four different aerosol types, five different visibilities (5, 10, 23, 50, 100), different water-vapour amounts, different standard atmospheres, and surface models. No atmospheric clear sky state is expected for which the MLB fit will not work.

For our purpose, the sense of an appropriate fitting function is to save calculation time without losing ‘‘significant’’ accuracy. The question if a fitting function is usable for that purpose depends on the difference between the fitted values and the RTM calculated values. The differences in the broadband irradiance (306.8-3001.9 nm) are usually less than 8 W/m² for high SZA and less than 5 W/m² for SZA below 75 degree (8 and 4 W/m² for direct irradiance, respectively). For the wavelength bands the differences are typically less than 1 W/m² below a SZA of 75 degree.

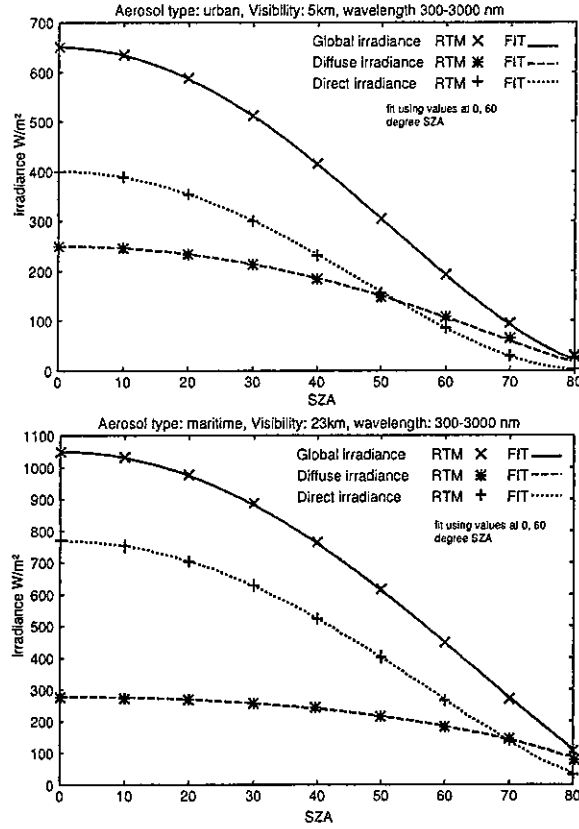


Fig. 2. Comparison between RTM calculations and fit using the modified Lambert-Beer relation for different atmospheric states.

2.3.1 Discussion

For **monochromatic radiation**, τ is constant and consequently equals τ_0 for all SZA. In case of **wavelength bands**, τ is not constant, but changes smoothly with increasing SZA. τ_0 is just the optical depth at $\theta_z=0$ and no longer equal to τ for all SZA. The reason for that is the non-linear nature of the exponential function; the monochromatic optical depths are, in contrast to the irradiance, not additive.

$$I = I(\lambda_1) + I(\lambda_2), \text{ but } \tau \neq \tau(\lambda_1) + \tau(\lambda_2) \quad (7)$$

That is the reason why a correction of the optical depth, or equivalent to this, of the parameter $\frac{\tau}{\cos(\theta_z)}$ is necessary.

With respect to global irradiance it has to be mentioned that the Lambert-Beer law (equation 2) is still a good approximation for “monochromatic” global radiation and moderate aerosol load, using τ_0 (see Fig. 3). For high aerosol load, the modified Lambert-Beer relation has to be used in order to get a good match with explicit RTM results. Moreover, for wavelength bands the use of the modified Lambert-Beer relation is absolutely necessary. The Lambert-Beer relation describes the at-

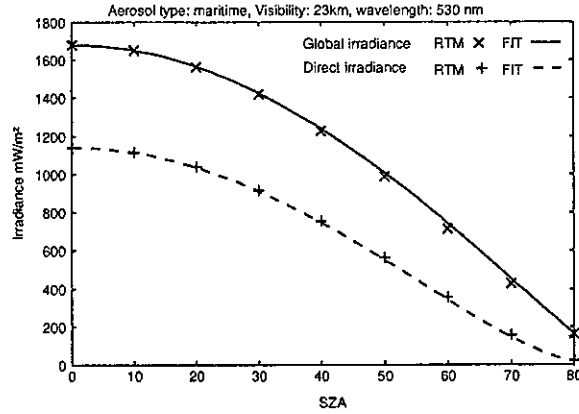


Fig. 3. For monochromatic radiation the Lambert-Beer relation is still a good approximation if the "vertical" optical depth τ_0 is used. In order to yield a better match a correction of formula 2 (MLB relation) is necessary.

tenuation of incoming radiation. The incoming diffuse radiation at the top of the atmosphere is negligible. The source of diffuse radiation is the attenuation of the direct radiation due to scattering processes. Hence the Lambert-Beer law is related to the amount of diffuse radiation, but does not describe the magnitude of the diffuse radiation. However, fitting with the modified Lambert-Beer relation works very well (see Fig. 2).

2.4 Radiative Transfer Model

The radiative transfer model (RTM) used within the clear-sky module, libRadtran³, is a collection of C and Fortran functions and programs for calculation of solar and thermal radiation in the Earth's atmosphere. It has been validated by comparison with other models (Koepke et al., 1998), (Van Weele et al., 2000), and radiation measurements (Mayer et al., 1997). It is very flexible with respect to the atmospheric input, e.g. different possibilities for the input of the aerosol information can be chosen by the user.

LibRadtran offers the possibility of using the correlated-k approach of Kato et al. (1999). The correlated-k method is developed to compute the spectral transmittance (hence the spectral fluxes) based on grouping of gaseous absorption coefficients. The main idea is to benefit from the fact that the same value of the absorption coefficient k is encountered many times over a given spectral interval. Thus, the computing time can be decreased by eliminating the redundancy, grouping the values of k , and performing the transmittance calculation only once for a given value of k .

³ available at <http://www.libradtran.org>

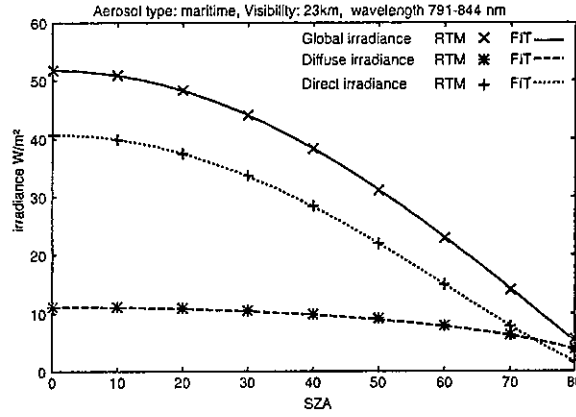


Fig. 4. Comparison between RTM calculations and fit using the modified Lambert-Beer relation. Example for a fit within a small wavelength band.

Using the correlated-k option, the spectral resolved data can be calculated operationally in MSG pixel resolution, a new feature, so far not implemented in the Heliosat or Heliosat-2 method. Consequently, SOLIS calculates the global, direct, and diffuse irradiance, not only for the broadband wavelength region (300-300nm), but for each of the Kato correlated-k (Kato et al., 1999) wavelength bands. The spectral output is provided for 27 bands between 306.8 and 3001.9 nm, which is sufficient for solar energy applications. Also additional wavelength bands below 306.8 nm or above 3001.9 nm can be used. The MLB relation works very well for the spectrally resolved data, see figure 4 as an example.

2.5 Further benefits of the MLB function with respect to the use of water-vapour, aerosol and ozone input information

The modified Lambert-Beer relation is defined with the parameters "vertical" optical depth and the correction parameters a_i . These parameters are calculated for a given atmospheric state (O_3 , $H_2O_{(g)}$, AOD). A useful feature of the MLB is that different water-vapour or ozone content effect the "vertical" optical depth τ_0 and not the correction parameter a . Since τ_0 is calculated at a SZA of zero degree, the calculation and usage of look-up tables is straightforward, because calculations at zero degree SZA deal with vertical columns and not with slant columns. For aerosols, both quantities – τ_0 and a_i – change for different values of the aerosol optical depth (AOD). In contrast to O_3 and $H_2O_{(g)}$, which are pure absorbers, aerosols are strong scattering particles, effecting not only τ_0 but also the correction parameter a_i . If the changes in a_i are neglected and only τ_0 is corrected, deviations occur increasing with increasing SZA. Consequently, another correction has to applied. In the case of aerosols, deviations from the assumed value can be approximately corrected by

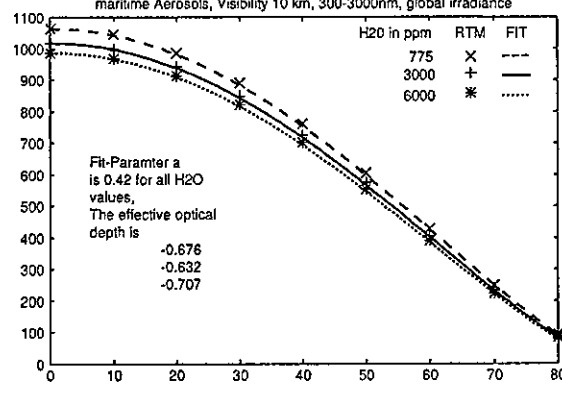


Fig. 5. Correction of H_2O deviations. The values derived with the MLB relation are compared for different $H_2O_{(g)}$ amounts. H_2O is specified in ppm (parts per million). Recalculation of the vertical optical depth leads to a good agreement between MLB values and the explicit RTM runs for the same a_i .

applying the following equations. To correct for increase of AOD from τ_{A1} to τ_{A2}

$$I_{cor} = 2 * I_{MLB}^{\tau_{A1}} * \frac{I^{0,\tau_{A2}}}{I^{0,\tau_{A1}}} - I^{0,\tau_{A2}} * \cos(\theta_z) \quad (8)$$

To correct for decrease in AOD from τ_{A2} to τ_{A1}

$$I_{cor} = 0.5 * (I_{MLB}^{\tau_{A2}} * \frac{I^{0,\tau_{A1}}}{I^{0,\tau_{A2}}} + I^{0,\tau_{A1}} * \cos(\theta_z)) \quad (9)$$

Here $I_{MLB}^{\tau_{Ai}}$ is the diurnal variation of the irradiance for the AOD A1 or A2, as given by the modified Lambert-Beer fit, $I^{0,\tau_{A2}}$ and $I^{0,\tau_{A1}}$ are the irradiances at a SZA of zero for AOD A1 and A2 respectively. Based on these equations (8,9) the correction and use of look-up tables is straightforward. Look-up tables, providing the irradiance for different AOD, has only to be calculated for a SZA of zero. All other information, needed to apply the above correction equations, are provided by the MLB-fit, using daily values as input. By this way the effect of deviation from the daily value can be corrected in an easy and fast manner. Yet, before the correction methods would be included in the operational SOLIS version further validations and optimisation of the correction procedures have to be performed.

3 Intrinsic precision of the SOLIS irradiance

In this section the atmospheric data input is retrieved from the ground-based measurements used also for the model – solar irradiance data comparison. The main focus of this comparison is therefore to investigate the intrinsic precision of the direct-beam model.

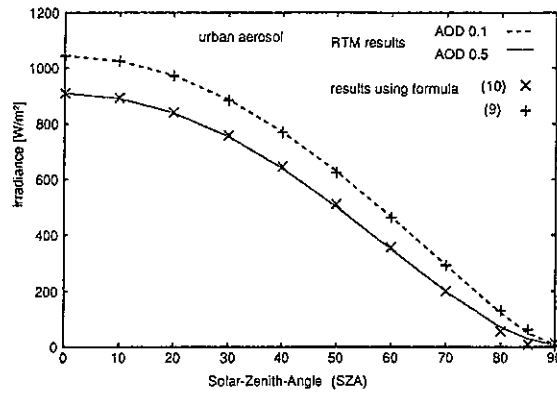


Fig. 6. Correction of Aerosol deviations, here for urban aerosols. The correction leads to an good agreement below SZA of 75 degree. The correction works also if marine aerosol with a AOD is corrected to urban aerosols with an AOD of 0.5.

3.1 Comparison of model results against ground measurements

Measurements: The direct-beam and global irradiance produced with the SOLIS scheme is compared with ground measurements taken at 5 stations with different latitudes, altitudes, and climates as given in Table 2. The comparison is done against measurements for clear and stable meteorological conditions, and for different water-vapour and aerosol atmospheric loads. From each of the 5 data bases, 2 to 4 clear days are extracted for winter and summer season. The stability of the atmospheric conditions is manually verified for each day: during the considered period of time, the water-vapour content, the aerosol optical depth and the Linke turbidity coefficient as defined by Ineichen and Perez (2002) are relatively stable as illustrated for February 14, 2002 in Eugene (OR) on Figure 7⁴. The days used in this comparison are listed in table 3.

Quality control has been done to eliminate specific measurements for which the direct-beam sensor is obstructed, but not the global sensor.

⁴ When a complete day is extracted, the morning/afternoon symmetry is respected

Table 2

Ground stations used for the model-measurements comparison

Station	latitude	altitude	climate	time base
Albany (NY)	42.7°	100 m	humid continental	1 min.
Burns (OR)	43.6°	1265 m	semi-arid	5 min.
Eugene (OR)	44.1°	150 m	temperate	5 min.
FSEC-Cocoa (FL)	28.3°	8 m	subtropical	6 min.
Geneva (CH)	46.2°	410 m	semi-continental	1 min.

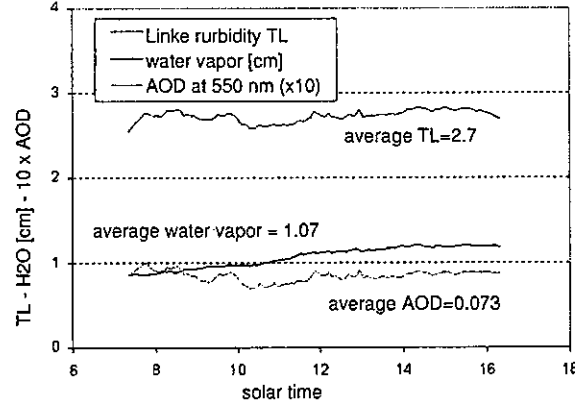


Fig. 7. February 14, 2002, Eugene (OR). The stability of the atmospheric parameters is illustrated versus solar time.

Retrieval of the atmospheric parameters: For all the data, the Linke turbidity T_L can be calculated from the normal direct-beam radiation. In order to insure compatibility, even if the turbidity is relatively stable during the considered periods, the coefficient is evaluated at air mass 2. The water vapor column w is evaluated from ground measurements of the ambient temperature and relative humidity. With the knowledge of T_L and w , and with the help of a model developed by Ineichen (2003), the aerosol optical depth can be retrieved. These three parameters are given in table 3 for the considered data.

An average value of 340 DU for the ozone content is taken for the comparison. It has been shown (Ineichen 2003) that the influence of different ozone columns on broadband irradiance estimated by SOLIS is negligible.

Comparison: The result of the comparison is given in figure 8. The graph illustrates the modelled horizontal direct-beam irradiance versus the ground measurements. The mean bias difference between model and measurements (MBD) and the root mean square difference (RMSD) for the 4320 values are the following:

Table 3

Aerosol load, water-vapour column, and Linke turbidity for the 13 considered days.

station	day , year	tau 550	w [cm]	TL
Albany	June 25, Sept. 16 , 2001	0.089, 0.048	3.0, 1.0	3.2, 2.5
Burns	Jan. 15, June 15, Aug. 12 , 2002	0.027, 0.093, 0.053	0.4, 2.0, 1.0	2.0, 3.1, 2.5
Eugene	Feb. 14, Oct. 17 , 2002	0.073, 0.032	1.1, 1.5	2.7, 2.5
FSEC	March 29, Nov. 28 , 1999	0.142, 0.081	2.0, 2.0	3.5, 3.0
Geneva	July 21, March 31 , 1996, 98	0.093, 0.384	1.5, 1.1	3.0, 5.3
Geneva	April 7, July 19 , 2003, 02	0.083, 0.087	0.6, 1.7	2.6, 3.0

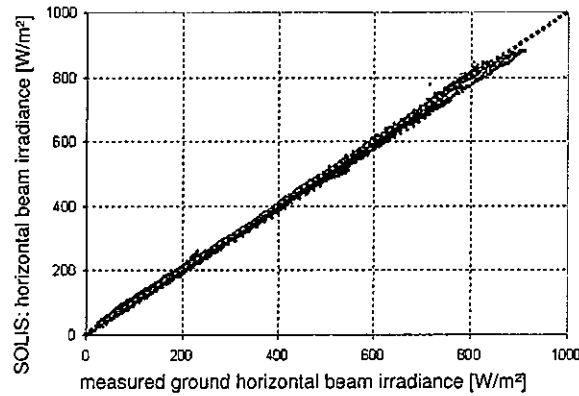


Fig. 8. Horizontal direct-beam irradiance evaluated by SOLIS versus the correspondent ground measurements.

- horizontal direct-beam irradiance: MBD = -1 W/m^2 or -0.2% and the RMSD = 11 W/m^2 , or 2.3%
- horizontal global irradiance: MBD = 0 W/m^2 and the RMSD = 22 W/m^2 , or 4.0%

The result for the global irradiance is remarkably good, taking into account that the same aerosol type was used for all the simulations. It is important to note that for the purpose of this comparison, the atmospheric clear-sky parameters are retrieved from the direct-beam measurements against which the model is compared. Within this scope the result of the direct-beam comparison can be considered as the intrinsic precision of the SOLIS model, if accurate daily values of the atmospheric clear-sky parameter are used as input. ⁵

4 Application of the model: Comparison with measurements using autonomous atmospheric input

The purpose of the comparison is to discuss the advantages and benefits of the SOLIS clear-sky module especially with respect to the use of aerosol and water-vapour information instead of turbidity. The benefits and limitations of the currently available atmospheric input data is discussed briefly as well. Therefore, calculation using the described SOLIS scheme are compared with measurements from the IDMP station in Freiburg ($47^\circ 59' N$, $7^\circ 50' E$) and with measurements of the meteorological station in Bergen, Norway ($60.4^\circ N$ $5.3^\circ E$). Additionally, SOLIS calculations are compared with the clear-sky model used in the Heliosat method (Cano et al., 1986) and (Beyer et al., 2003).

⁵ Daily values are not daily means.

4.1 Atmospheric data input

The present study deals with the clear-sky case, relevant input parameter are ozone, water-vapour and aerosols. Standard climatology profiles are used in order to take the effect of Rayleigh scattering and the effect of other gas absorber into account.

Ozone

To derive actual distributions of total column ozone, backscatter measurements from the Global Ozone Monitoring Experiment (GOME) onboard the ERS-2 satellite are used (Burrows et al., 1998). The core element of the retrieval is a DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy) fitting technique.

Due to the scanning geometry, the level-2 total column ozone data are distributed heterogeneously in time and space. To gain synoptic distributions of total column ozone and to consider atmospheric variability the data assimilation technique Kalman-Filtering is used (Daley, 1991). It is applied in conjunction with a spectral statistical planetary wave approach (Bittner et al., 1997) and (Bittner and Erbertseder, 2000) For this study GOME GDP level 2 data version 3.0 from ESA/DLR are used, this data are also available at <http://wdc.dlr.de>. The data assimilation approach delivers global ozone column maps for a certain point in time with a horizontal resolution of 0.36 degrees.

Water-vapour

Total water-vapour column data (TWC) were prepared using the TOVS (TIROS Operational Vertical Sounder) instrument on the NOAA-14 satellite. TOVS raw data are analysed with the International TOVS Processing Package (ITPP, (Jun et al., 1994) and (Jun, 1994)), a physical retrieval scheme to derive atmospheric temperature and water-vapour profiles for both cloudy and cloud-free situations. The average distance between retrievals is approximately 80 km but the data are distributed irregularly in space (polar orbiting satellite). Therefore, a distance weighting interpolation scheme is applied which delivers twice daily an European TWC data set with a spatial resolution of 0.5 degrees (Schroedter et al., 2003). This data product is available at the World Data Center for Remote Sensing of the Atmosphere (<http://wdc.dlr.de>). The quality of TWC in comparison with the ECMWF (European Center of Middle Range Weather Forecasting) model has been monitored for the whole year 2000. The comparison delivers differences from 0.19 ± 4.41 mm⁶ for December 2000 to 4.56 ± 5.75 mm for August 2000. This fits the required data accuracy of less than 10 mm very well.

In the future it is planned to use water-vapour column information derived from MSG itself. This will provide an improved spatial resolution and a better coverage for both Europe and Africa. It can be expected that the accuracy of the retrieved $H_2O_{(g)}$ amounts will be in the same range.

⁶ bias \pm standard deviation

Aerosols

The new surface irradiance scheme allows the use of further aerosol data sets with aerosol optical depth (AOD) and aerosol type as parameters. It has recently been shown, that aerosol parameters can be retrieved over land from the MISR and MODIS instruments onboard the EOS-TERRA1 (launched December 1999) and EOS-AQUA (launched May 2002) satellites (Tanre et al., 2001) and (Kahn et al., 1997) and from a synergetic retrieval (Holzer-Popp et al., 2002a) and (Holzer-Popp et al., 2002b) of SCIAMACHY and AATSR onboard the ENVISAT satellite (launched March 2002). Therefore, the proposed new scheme holds the potential to use this upcoming operational satellite data sets in order to include up-to-date aerosol information.

In order to get the information about the aerosols for the comparison presented in this paper, Linke turbidity values based on Kasten (1996) together with the GADS/OPAC aerosol climatology are used. The GADS/OPAC climatology (Hess et al., 1998) and (Koepke et al., 1997) provides information of the AOD and the aerosol type, whereby the AOD is dependent on the relative humidity. Yet, the spatial and temporal resolution of the GADS/OPAC climatology is coarse, as only summer and winter season and a 5 degree spatial resolution is available.

The Linke turbidity climatology provides Linke turbidities in a monthly and 5 minutes of arc angle resolution worldwide (available at <http://www.helioclim.net/-linke/index.html>). It has to be noted that this small spatial resolution is just possible, using improved interpolation routines such as data fusion. The underlying measurement data have a much higher spatial resolution.

4.2 Comparison of measurements and model, Freiburg, August 2000

Cloud-free situations were selected according to the cloud-index derived with the Heliosat method from METEOSAT images. A situation was assumed to be cloud-free if the cloud index n of the respective pixel was within the interval from -0.03 to 0.03 and the spatial variation of the cloud index was less than 0.02. It is likely that some situations with partial cloud cover are still included, which especially effects the direct irradiance, leading to an increasing statistical uncertainty.

The ground measurements have originally a temporal resolution of 10 seconds. They are averaged to 30 minute means in accordance with the temporal resolution of the satellite. The point in time, when the pixel above the measurement station is scanned from the satellite lies in the middle of the 30 minutes averaging window. The input values for ozone and water-vapour were 275 DU and 15mm, respectively. Note, that ozone has no big effect on the broadband irradiance, but does on the UV.

The turbidity map provides a turbidity of 4 for the respective months. That corresponds to a visibility of 34 km and an aerosol optical depth (AOD) of 0.23 re-

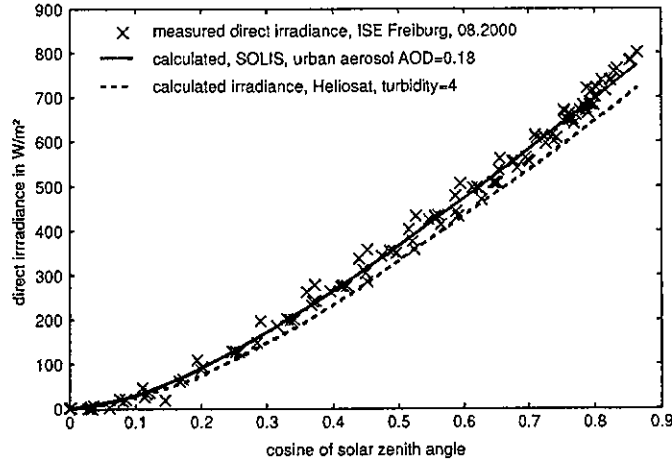


Fig. 9. Comparison between SOLIS and measurements using the GADS/OPAC information for the aerosols. The calculated Heliosat clear-sky irradiance is also diagrammed. The differences between the models are mainly due to the different atmospheric input information. The conversion of turbidity to visibility has been performed with the radiative transfer model MODTRAN (Abreu and Anderson, 1996) GADS/OPAC provides an AOD of 0.18-0.25 for relative humidities between 50 and 80 % and urban as an aerosol type. The range of the AOD is in consistency with the visibility derived from the Linke turbidity climatology. The average relative humidity for the clear-sky days was approximately 50 %, leading to an AOD of 0.18.

In figure 9 and 10 the comparison between SOLIS calculated and measured direct and global irradiance is diagrammed. It has to be noted that whether urban or rural aerosols are used, no significant differences in the calculated direct solar irradiance occur. Hence, just the results for the urban aerosols are diagrammed. In the case of global irradiance, the chosen aerosol type has a significant effect on the global irradiance. In both figures, the results of the Heliosat clear-sky model, described in Beyer et al. (2003), are also diagrammed.

Using the aerosol information provided by the OPAC/GADS climatology (AOD of 0.18, urban aerosol type) as input, the calculated global and direct irradiance matches the measurements very well, as shown in figure 9 and figure 10. The relative root mean square error is 1.9 % for global and 4.2 % for direct irradiance with a relative bias of 0.6 and 0.5 % respectively. Also the SZA dependency is reproduced very well by the SOLIS model.

In contrast to the results of the SOLIS calculations the Heliosat model results in a good match for the global irradiance, but with a significant underestimation of the direct irradiance for the given turbidity of 4. Since the turbidity defines the attenuation of the direct irradiance, this indicates that the chosen turbidity is too low. Yet decreasing the turbidity to values around 3 leads to a better match between

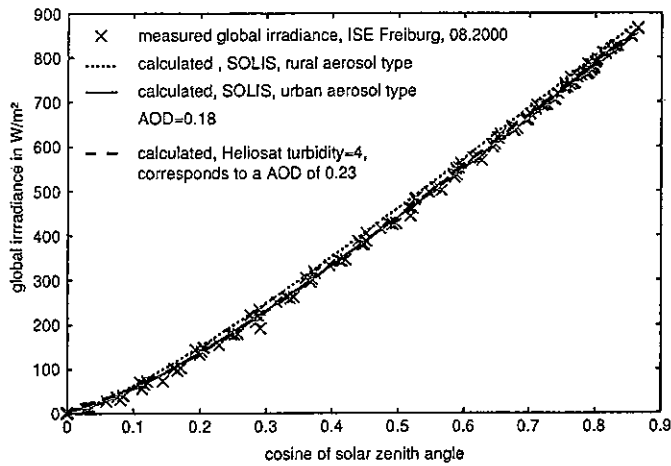


Fig. 10. Comparison between SOLIS and measurements using the GADS/OPAC information for the aerosols. The calculated Heliosat clear-sky irradiance is also diagrammed.

the measurements and the Heliosat modelled direct irradiance on the one hand, but it leads to an overestimation of the global irradiance on the other hand. The reason is the redundant information of the turbidity in comparison with a separated treatment of aerosol type, aerosol optical depth, and water-vapour. The effect of the aerosol type on the global irradiance can not be considered by using turbidity.

Consequently, a consistent match between measurements and calculated direct and global irradiance is only possible using information about the aerosol optical depth, the aerosol type and the water content "separately". Using the Heliosat clear-sky model or any other model that is just based on turbidity, the effect of different aerosol types on the global irradiance cannot be considered, because the information about the atmospheric state is redundant. This effect is even significant for the measurement site, but is higher for sites with higher aerosol load, or for sites characterised by special types of aerosols events, like desert storms or biomass burning. That is a drawback of Heliosat-1 and 2, but demonstrates the advantages of the SOLIS model. Moreover, reliable information of the spectral distribution of the irradiance cannot be derived by using only turbidity, without any additional information about the atmospheric state. Additionally, changes in stratospheric aerosols, e.g. an increase of the load after a volcanic eruption, cannot be treated with the current Heliosat method without a refitting of the empirical equation. Using SOLIS, just the enhanced aerosol load has to be changed in the input file and the effect is considered.

In a comparison with measurements at Mannheim (Germany), it was possible to verify that urban aerosols with a AOD of 0.18 is a reliable input for Freiburg. The station Mannheim is nearby the station Freiburg and is characterised by a similar micro-climate - cities within the Rhine valley climate. The bias between SOLIS results and measurements was below 1 per mill.

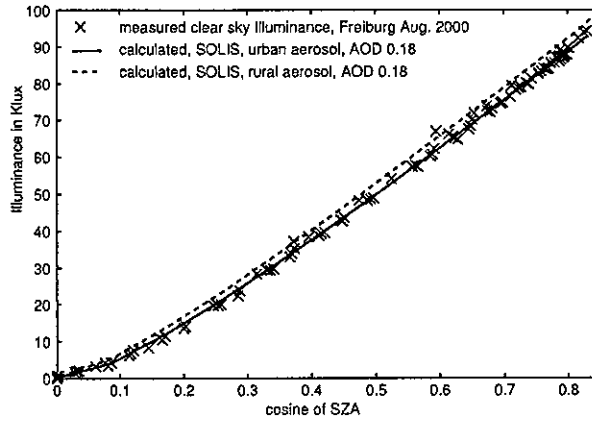


Fig. 11. Measured and modelled illuminance, clear-sky situations, Freiburg August 2000

4.2.1 Spectral resolved irradiance data

Using the same atmospheric input (urban aerosol, AOD=0.18), the measured and calculated illuminance has been compared for August 2000, Freiburg. The illuminance is a measurement of a quantity of light as perceived by the human eye. In order to calculate the illuminance, the spectrally resolved irradiance output of SOLIS is weighted with the light-sensitivity of the human eye. The derived value is then multiplied with 0.683 in order to convert W/m^2 to Klux. The measurements and the calculation matches very well, demonstrating that the spectral output of the model is reliable, see figure 11. In addition the model results for rural aerosols are also diagrammed.

4.3 General remarks

It has to be mentioned that a good match between measured and calculated irradiances cannot be expected for every month within one season. Similar comparisons for September 2000 and 1999 lead to an acceptable but inferior match between measurements and SOLIS calculated irradiance. This is most probably due to the fact that a seasonal aerosol climatology is too coarse, see also section 4.4. Changes in the aerosol content within a season due to transport processes are not considered, but they effect the measurements. Using climatological atmospheric data instead of daily values as input to SOLIS increases the RMSE significantly. This effect has been investigated within a study for Geneva. (P. Ineichen, personal communication).

4.4 Comparison in Scandinavia

SOLIS calculations are compared against ground measured hourly global and direct irradiance of the Nordic site: Bergen, Norway (60.4°N 5.3°E). Cloud free days were selected according to the following criteria: 1) The ground observed cloud cover should not exceed 1 octa during the day. 2) The curve of direct-beam normal radiation should be smooth and symmetric around noon solar time. To allow the comparison with the clear-sky model of Heliosat, which uses monthly Linke turbidity coefficients as input, days were selected from the same month (here May). The selected days are shown in table 4. The value of the Linke turbidity for May is 3.6 for Bergen. Daily values of total water column (TWC) and ozone were used as

Table 4

The clear days (all in May) used in this comparison.

station	day	year	water column [mm]	ozone [DU]
Bergen (60.4N,5.3E)	7, 19	1999	7.5, 10.6	368, 316
	6, 8	2000	8.1, 11.6	347, 342
	12, 13, 14	2000	13.6, 11.0, 8.1	309, 306, 319

input to SOLIS, see 4.1. The GADS/OPAC aerosol climatology suggests 'maritime tropical' and 'summer maritime tropical' as aerosol types for Bergen. In SOLIS 'maritime' aerosols were used, in addition to 'rural' and 'urban' ones. For Bergen the aerosol optical depth at 0.55 μ m is given as 0.06 and 0.15 for a relative humidity of 10 % and 90 %, respectively. The actual relative humidity varies between 10 % and 90 % for the clear days, with the lowest humidities around and after noon.

4.4.1 Results

Direct irradiance The figure 12 shows the observed direct irradiance for the clear days in Bergen plotted against the SOLIS and Heliosat modelled values. Most observations fit well the SOLIS data for low and high aerosol optical depth (0.06 and 0.15). However, for one day in Bergen the measured values are clearly lower and fit well with a higher aerosol optical depth of 0.28. This value is not unreasonable, Olseth and Skartveit (1989) found the range of aerosol optical depth in Bergen to be 0.07 to 0.28 with a mean value of 0.13. The effect of water-vapour is seen to be smaller than the effect of aerosols. The effect of ozone is negligible (for broadband irradiance as here). However, for spectral output, also accurate values of water-vapour and ozone are of great importance.

It is clear that the Heliosat model with monthly input cannot be expected to be very accurate on day to day variations, but may give good mean values. It appears, however, that SOLIS is capable of reproducing hourly radiation, given that the daily input (in particular aerosols) is accurate.

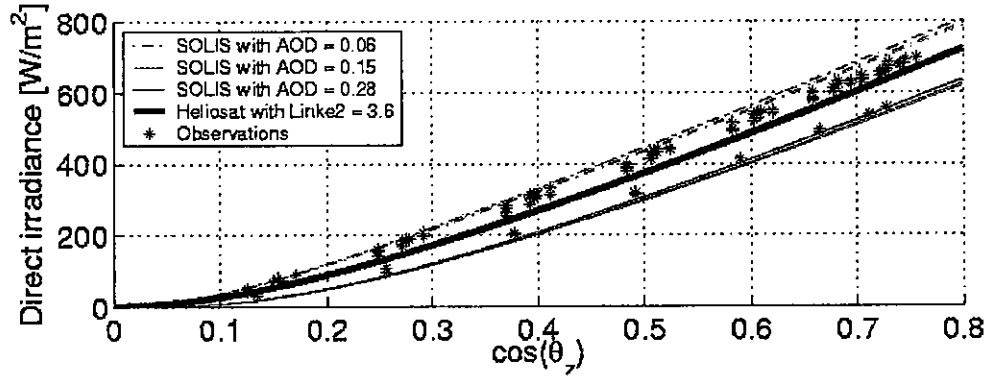


Fig. 12. Observed direct irradiances versus modelled values by SOLIS and Heliosat. The aerosol optical depths are shown in the legend. Aerosol type is "maritime".

Global irradiance Observed global irradiances for Bergen are plotted against SOLIS and Heliosat modelled values in figure 13 (top). Here the SOLIS values are too high, while the Heliosat clear-sky model is closer to the observed values. However, if the aerosol type is changed from 'maritime' to 'urban', SOLIS match the observed values much better (figure 13, bottom). For the calculated direct irradiance the aerosol type was of little or no importance, but for global irradiance the aerosol type (single scattering albedo) largely affects the diffuse part. Since Bergen is a city with 235000 citizens, urban aerosols are not unreasonable. The GADS/OPAC climatology has quite coarse resolution (5 degrees), so it cannot account for microclimatic conditions represented by cities, especially if they are surrounded by a rural region.

5 Discussion

5.1 Treatment of clouds

The integrated use of the RTM is performed within the clear-sky module. For the treatment of clouds the n-k relation or the COD option is used. With respect to the COD option, a RTM is used to find the parameterisation, but not directly integrated. The question arises why an integrated use of a RTM within the cloud module is not needed on the one hand or not possible on the other. The n-k or COD option works well for almost homogenous cloud situations. Consequently, the difficulties or limitations of both options arises from heterogenous cloud effects.

With respect to 3-D cloud effects an operational usage of a RTM for the treatment of heterogenous clouds (whether directly or using pre-calculated look-up tables) is not feasible today. The limitations of 3-D cloud modelling do not enable realistic

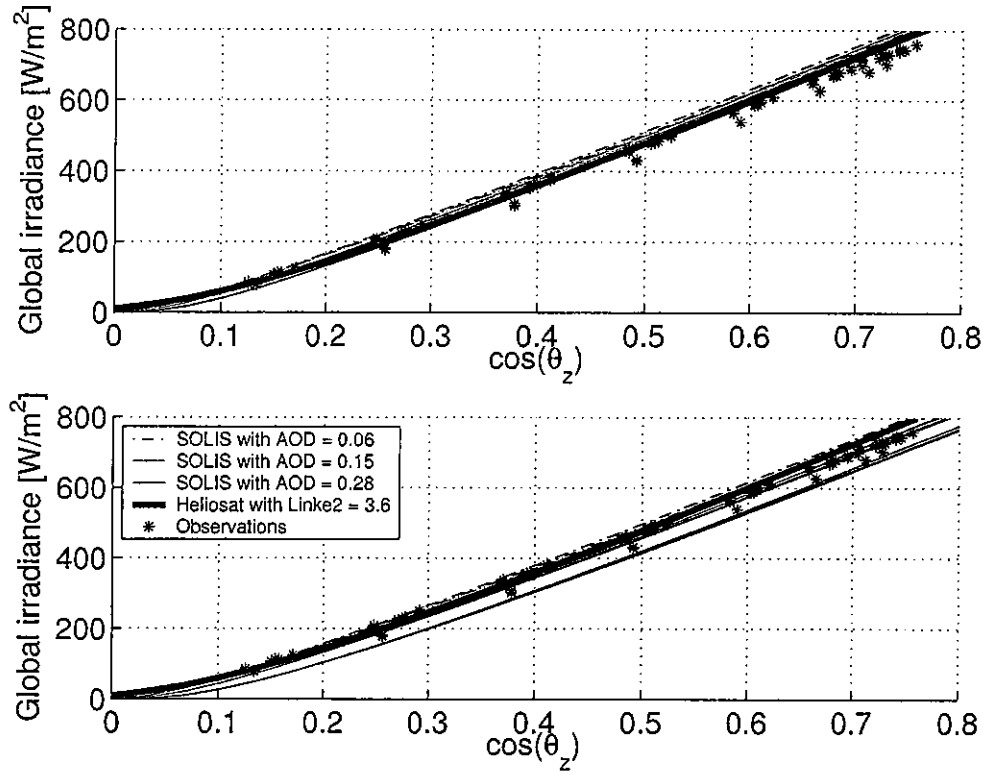


Fig. 13. Same as figure 12a, but for global irradiance. Aerosol type is 'maritime' on upper figure, and 'urban' on lower figure.

RTM calculations of 3-D cloud problems in an operational manner. Just case studies are feasible. With respect to the operational use of a RTM, the problem is the non-availability of realistic specification of heterogeneous clouds from measurements. MSG will not provide sufficient information about 3-D cloud characteristics. No other satellite or measurement setup provides this information for the needed temporal resolution and spatial coverage nowadays. Besides an explicit or integrated use of RTM is not practicable since the needed calculation time of 3D-RTM models is too large for an operational adaption.

Spectral resolved irradiance for cloudy situations

Within previous studies, it has been shown that the cloud index is independent on the wavelength in the range of the MSG visible channels. Yet, the shape of the spectral clear-sky irradiance changes due to the scattering effects in consequence of the cloud particles. In order to correct the change in the spectral shape the RTM model libRadtran has been used to calculate look-up tables. First comparisons between measured and simulated illuminance indicate that the spectrally resolved output is now serviceable for "all-sky" situations as well. Yet further validations should be done.

Using the COD option for the treatment of clouds, the effect of clouds on the spec-

tral distribution of clear-sky irradiance is already considered. Consequently, the integrated use of the RTM is the basis for spectral resolved solar irradiance data for all-sky situations, as well.

6 Summary and Conclusion

Within this paper the power and advantages of the new SOLIS model have been discussed. The main scope has been the SOLIS clear-sky module, but also the treatment of the clouds, even though this is still under development ⁷, has been briefly discussed in order to explain the expected benefits of the integrated RTM use for the all-sky situations as well.

The integration of the RTM into the calculation schemes is associated with a high flexibility with respect to changes of the atmospheric state and the different user requirements on the solar irradiance data. SOLIS provides the possibility to use enhanced information of the atmospheric state and, hence, the potential to improve the accuracy of the calculated direct, global, and diffuse irradiance. Additionally, spectrally resolved data can be calculated operationally in MSG pixel resolution.

The Modified Lambert-Beer relation enables the integrated use of RTM within the clear-sky scheme. The integrated use of RTM is linked with high flexibility relating to the input of the atmospheric state, changes in theory (e.g. new aerosol models), and the desirable output parameters.

The integrated use of the RTM is linked with the following benefits:

- Spectral information is automatically provided using the correlated-k option included in the RTM libRadtran package (<http://www.libradtran.org/>).
- Consistent calculations of global, direct, and diffuse radiation for clear sky cases within one single scheme considering different aerosol types and not only turbidity. Hence, an improved estimation of the relation between global and direct radiation is possible, especially for clear-sky situations. The separated use of H_2O and Aerosol information is a requirement for accurate information of the spectral distribution of irradiance.
- Deviations of the atmospheric state from the average (O_3 , $H_2O_{(g)}$, aerosols) can be easily corrected using the results of the modified Lambert-Beer fit.
- Clear and easy linkage with cloudy sky scheme, whereby the treatment of heterogeneous cloud effects is not restricted.

The usage of the modified Lambert-Beer law enables not only the direct integration of a RTM into the irradiance scheme, but also the potential for the calculation and use of easy handling look-up tables. The advantages of the modified Lambert-Beer

⁷ Yet a SOLIS all-sky working version is available on request

relation and hence the integrated RTM use can be adapted to other solar irradiance models as well and is therefore, a new milestone in solar irradiance modelling.

The SOLIS model has been validated in three steps.

- In section 2.3 it has been demonstrated that the MLB function matches the RTM results very well. The differences in the broadband irradiance (306.8-3001.9 nm) are usually less than 8 W/m² for high SZA and less than 5 W/m² for SZA below 75 degree (8 and 4 W/m² for direct irradiance, respectively).
- In section 3 it has been demonstrated that SOLIS is able to reproduce very accurately (hourly) values of direct and global broadband irradiance if accurate daily atmospheric input parameters are used. The estimated RMSD is 2.3 % for direct irradiance and 4 % for global irradiance.
- In section 4 SOLIS has been compared with measurements and with the Heliosat method, whereby $H_2O_{(g)}$ and O_3 retrieved from satellite data and the GADS/OPAC aerosol climatology ((Hess et al., 1998) and (Koepke et al., 1997)) have been used as input to SOLIS. It has been demonstrated that SOLIS is able to reproduce the measurements very well within the scope of the uncertainties introduced by the rough spatial and temporal resolution of the aerosol climatology. For broadband clear-sky irradiance aerosols are by far the most important parameter. Since a model depends on accurate atmospheric input data, there is a urgent need to improve the information about aerosols. Additionally, it has been shown that the aerosol type has an significant effect on the global irradiance. A consistent match between model and measurements for both global and direct irradiance was only possible by consideration of the aerosol type. In contrast to the Heliosat method (Beyer et al., 2003), which is dedicated to use turbidity information, the full information about the clear sky atmosphere, including aerosol type, can be used by SOLIS.

The improvements in the art of retrieval during the last years are impressive and still going on. Together with new remote sensing instruments such as SCIAMACHY or SEVIRI (aboard ENVISAT, MSG) it can be expected that the information about the atmospheric state, especially with respect to clouds and aerosols, will be further improved. In order to benefit from the enhanced information about the atmospheric state, a model such as SOLIS is necessary.

Keeping this in mind the final conclusion can be drawn that the enhanced capabilities of the new MSG and ENVISAT satellites, together with the new type of solar irradiance scheme, SOLIS, will provide solar irradiance data with high accuracy, high spatial and temporal resolution and large geographical coverage, all within the European Heliosat-3 project.

ACKNOWLEDGEMENTS:

The Heliosat-3 project is funded by the EC (NNK5-CT-200-00322). We thank Arve Kylling (NILU) and Bernhard Mayer (DLR) for providing the libRadtran RTM package. The DWD is acknowledged for the data of the Mannheim station. Thanks

to A. Drews for the grammatical corrections.

References

- Abreu, L., Anderson, G., 1996. The MODTRAN 2/3 report and LOWTRAN 7 model. Tech. rep., Philips Laboratory, Hanscom.
- Beyer, H., Costanzo, C., Heinemann, D., 1996. Modifications of the heliosat procedure for irradiance estimates from satellite images. *Solar Energy* 56, 207–212.
- Beyer, H. G., Hammer, A., Heinemann, D., Hoyer, C., R., K., Lorenz, E., Müller, R., 2003. Solar energy assessment using remote sensing technologies. *Remote Sensing of the Environment* Accepted for publication.
- Bittner, M., Dech, S., Meisner, R., Ruppert, T., 1997. Generating GOME level 3 data products at DFD. Tech. rep., DLR-DFD.
- Bittner, M., Erbertseder, T., 2000. The STREAMER project: An overview. In: *Air Pollution VIII*. WIT Press, Southampton, Boston.
- Burrows, J., Weber, M., Buchwitz, M., Rozanov, V., Ladstätter-Weissenmayer, A., Richter, A., de Beek, R., Hoogen, R., Bramstedt, K., Eichmann, K.-U., Eisinger, M., Perner, D., 1998. The Global Ozone Monitoring Experiment (GOME): Mission concept and first scientific results. *Journal of Atmospheric Sciences* 56, 151–175.
- Cano, D., Monget, J., Albuissou, M., Guillard, H., Regas, N., Wald, L., 1986. A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data. *Solar Energy* 37, 31–39.
- Daley, R., 1991. *Atmospheric Data Analysis*. Cambridge University Press.
- Fontoynt, M., Dumortier, D., Heinemann, D., Hammer, A., Olseth, J., Skartveit, A., Ineichen, P., Reise, C., Page, J., Roche, L., Beyer, H., Wald, L., 1997. Satellight: A european programme dedicated to serving daylight data computed from meteosat images. In: *Proceedings Lux Europa 1997*. Vol. The 8th European Lighting Conference, Amsterdam. [Http://www.satellight.com/indexgT.htm](http://www.satellight.com/indexgT.htm).
- Hammer, A., 2000. Anwendungsspezifische Solarstrahlungsinformationen aus Meteosat-Daten. Phd, School of Mathematics and Natural Sciences, University of Oldenburg.
- Hess, M., Koepke, P., Schult, I., 1998. Optical properties of aerosols and clouds: The software package opac. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 79, 831–844.
- Holzer-Popp, T., Schroedter, M., Gesell, G., 2002a. Retrieving aerosol optical depth and type in the boundary layer over land and ocean from simultaneous GOME spectrometer and ATSR-2 radiometer measurements. 1, Method description. *J. Geophys. Res.* 107, in press.
- Holzer-Popp, T., Schroedter, M., Gesell, G., 2002b. Retrieving aerosol optical depth and type in the boundary layer over land and ocean from simultaneous GOME spectrometer and ATSR-2 radiometer measurements. 2, Case study application and validation. *J. Geophys. Res.* 107, in press.
- Ineichen, P., 2003. Broadband comparison of SOLIS clear sky scheme against 5

- other clear sky models and 5 data banks, working paper Heliosat-3 project.
- Ineichen, P., Perez, R., 2002. A new airmass independent formulation for the Linke turbidity coefficient. *Solar Energy* 73, 151–157.
- Jun, L., 1994. Temperature and water vapour weighting functions from radiative transfer equation with surface emissivity and solar reflectivity. *Adv. In Atm. Sciences* 11 (4), 421–426.
- Jun, L., Fengxian, Z., Qingcun, Z., 1994. Simultaneous non-linear retrieval of atmospheric temperature and absorbing constituent profiles from satellite infrared sounder radiances. *Adv. In Atm. Sciences* 11 (2), 128–138.
- Kahn, R., West, R., McDonald, D., Rheingans, B., Mishchenko, M., 1997. Sensitivity of multiangle remote sensing observations to aerosol sphericity. *J. Geophys. Res.* 102, 16861–16870.
- Kasten, F., 1996. The Linke turbidity factor based on improved values of the integral rayleigh optical thickness. *Solar Energy* 56, 239–244.
- Kato, S., Ackerman, T., Mather, J., Clothiaux, E., 1999. The k-distribution method and correlated-k approximation for a short-wave radiative transfer. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* 62.
- Koepke, P., Bais, A., Balis, D., Buchwitz, M., de Backer, H., de Cabo, X., Eckert, P., Eriksen, P., Gillotay, D., Koskela, T., Lapeta, V., Litynska, Z., Lorente, J., Mayer, B., Renaud, A., Ruggaber, A., Schauburger, G., Seckmeyer, G., Seifert, P., Schmalwieser, A., Schwander, H., Vanicek, K., Weber, M., 1998. Comparison of models used for UV index calculations. *Photochem. Photobiol* 67, 657–662.
- Koepke, P., Hess, M., Schult, I., Shettle, E., 1997. Global aerosol data set. Tech. rep., MPI Meteorologie Hamburg Report No. 243.
- Kriebel, K.T., R. S., Gesell, G., 1989. Optical Properties of Clouds Derived from Fully Cloudy AVHRR Pixels. *Beiträge zur Physik der Atmosphäre* 62, 165–171.
- Lefèvre, M., Albuissou, M., Wald, L., 2002. Joint report on interpolation scheme "meteosat" and database "climatology i (meteosat)". Tech. rep., Report for the European Commission, available at <http://www.soda-is.com/publications>.
- Mayer, B., Seckmeyer, G., Kylling, A., 1997. Systematic long-term comparison of spectral UV measurements and UVSPEC modeling results. *J. Geophys. Res.* 102, 8755–8767.
- Nakajima, T., King, M., 1990. Determination of the optical thickness and effective particle radius of clouds from reflected solar radiation measurements. Part I: Theory. *Journal of the Atmospheric Sciences* 47 (15).
- Olseth, J., Skartveit, A., 1989. Observed and modelled hourly luminous efficacies under arbitrary cloudiness. *Solar Energy* 42, 221–233.
- Perez, R., Aguiar, R., Collares-Pereira, M., Dumortier, D., Estrada-Cajigal, V., Gueymard, C., Ineichen, P., Littlefair, P., Lund, H., Michalsky, J., Olseth, J., Renne, D., Rymes, M., Skartveit, A., Vignola, F., Zelenka, A., 2001. Solar resource assessment: A review. In: *Solar Energy - The state of the art*. No. ISBN 1 902916239 in ISES Position Papers. James & James Science Publishers, London, pp. 497–562.
- Perez, R., Renne, D., Seals, R., Zelenka, A., 1998a. The strength of satellite-based solar resource assessment. In: *Production of Site/Time-specific Irradiances from*

- Satellite and Ground Data, Report 98-3. New York State Energy Research and Development Authority, Corporate Plaza West, 286 Washington Avenue Extension, Albany, NY 12203-6399.
- Perez, R., Seals, R., Zelenka, A., 1998b. Production of site/time-specific hourly irradiances – satellite remote sensing vs. network interpolation. In: Production of Site/Time-specific Irradiances from Satellite and Ground Data, Report 98-3. New York State Energy Research and Development Authority, Corporate Plaza West, 286 Washington Avenue Extension, Albany, NY 12203-6399.
- Ricchiazzi, P., Yang, S., Gautier, C., Sowle, D., 1998. Sbdart: A research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the earth's atmosphere. *Bulletin of the American Meteorological Society* 79 (10).
- Saunders, R., Kriebel, K., 1988. An improved method for detecting clear sky and cloudy radiances from AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing* 9, 123–150.
- Schroedter, M., Olesen, F., Fischer, H., 2003. Determination of land surface temperature distributions from single channel IR measurements: an effective spatial interpolation method for the use of TOVS, ECMWF and radiosonde profiles in the atmospheric correction scheme. *Int. J. Remote Sensing* 24 (6), 1189–1196.
- Tanre, D., Kaufman, Y., Holben, B., Chatenet, B., Karnieli, A., Lavenu, F., Blarel, L., Dubovik, O., Remer, L., Smirnov, A., 2001. Climatology of dust aerosol size distribution and optical properties derived from remotely sensed data in the solar spectrum. *J. Geophys. Res.* 106 (18).
- Van Weele, M., Martin, T., Blumthaler, M., Brogniez, C., den Outer, P., Engelsens, O., Lenoble, J., Pfister, G., Ruggaber, A., Walravens, B., Weihs, P., Dieter, H., Gardiner, B., Gillotay, D., Kylling, A., Mayer, B., Seckmeyer, G., W., W., 2000. From model intercomparisons towards benchmark UV spectra for six real atmospheric cases. *J. Geophys. Res.* 105, 4915–4925.
- Wald, L., Albuissou, M., Best, C., Delamare, C., Dumortier, D., Gaboardi, E., Hammer, A., Heinemann, D., Kift, R., Kunz, S., Lefèvre, M., Leroy, S., Martinoli, M., Ménard, L., Page, J., Prager, T., Ratto, C., Reise, C., Remund, J., Rimoczi-Paal, A., Van der Goot, E., Vanroy, F., Webb, A., 2002. Soda: a project for the integration and exploitation of networked solar radiation databases. In: Pillmann, W., Tochtermann, K. (Eds.), In: *Environmental Communication in the Information Society*. No. Part 2. Published by the International Society for Environmental Protection, Vienna, Austria., pp. 713–720.
- Zelenka, A., Perez, R., Seals, R., Renne, D., 1999. Effective accuracy of satellite-derived hourly irradiances. *Theoretical and Applied Climatology* 62, 199–207.

Annexe II

Méthode de simulation d'images du canal à
large bande de Meteosat-7 utilisant les canaux
visibles de Meteosat-8

SIMULATING METEOSAT-7 BROADBAND RADIANCES AT HIGH TEMPORAL RESOLUTION USING VISIBLE CHANNELS OF METEOSAT-8

Sylvain CROS, Michel ALBUISSON, Lucien WALD

Groupe Télédétection & Modélisation, Centre d'Energétique, Ecole des Mines de Paris / Armines, BP
207, 06904, Sophia Antipolis cedex, France

Corresponding author: Lucien Wald, lucien.wald@ensmp.fr

ABSTRACT

This paper addresses the conversion on narrow-to-broadband top of atmosphere (TOA) radiances in the special case of the satellite Meteosat Second Generation (MSG). The advent of this new program poses the problem of the transfer of operational procedures from the previous satellite Meteosat-7 to MSG. An easy-to-implement fast-running method is proposed that combines the TOA radiances of the two narrow visible bands of MSG to produce TOA broadband radiances that are almost identical to those observed in the broadband channel of Meteosat-7. A comparison between Meteosat-7 actual radiances and these Meteosat-7 simulated-radiances shows errors with a negligible bias and a relative root mean square error (RMSE) less than 6%. After combination with the uncertainties found in the calibration procedures (10-13%), the total relative RMSE on the TOA radiances amounts to 12-14%. It is concluded that the Meteosat-8 images may be used in operational procedures that are currently applied to the Meteosat-7 images.

Keywords: Satellite, radiation, climatology

INTRODUCTION

This paper addresses the transfer of operational procedures from the previous series of Meteosat satellites to the series of the Meteosat Second Generation (MSG) ones. The Meteosat satellites are operated by Eumetsat -and before by ESA- since 1978 (Anonymous 1996). They cover Europe, Africa and the Atlantic Ocean. The satellite Meteosat-7 is the last of the first series of sensors and satellites and its operation phase should end in December 2005. These sensors comprise a broadband visible channel (400-1100 nm). The stability of this satellite program led to the development of several scientific applications of known reputation that are processing large amounts of broadband data in real-time procedures. Among them, are the computation of irradiances at surface level for assessment of radiative budget over the land (Cros *et al.* 2004; Diekmann *et al.* 1988; Rimoczi-Paal *et al.* 1999) or the ocean (Lefèvre *et al.* 2002), of biomass (Bonifacio *et al.* 1993; Rosema 1993) and of rainfall (Snijders 1991; La Barbera *et al.* 1995).

The advent of the new series Meteosat Second Generation (MSG) offers the opportunity of benefiting

from a greater time sampling -0.25 h instead of 0.5h- and a greater space sampling -1 km instead of 2.5 km (Schmetz *et al.* 2002). The first MSG, called Meteosat-8, was launched in 2003 and is in full operation since 28 January 2003. Sensors of the MSG series comprise a broadband channel (HRV, High Resolution Visible) similar to that of Meteosat-7. However, the image acquired in this channel is covering only two-thirds of the whole field of view because of limitations in downlink bandwidth (Fig. 1). In addition, the geometry is peculiar; the upper part of the image is centered on Europe while the lower part is centered on Africa. Data are missing at the junction of the two parts. Furthermore, its geographical coverage is subject to change with short notice (see online at Eumetsat Web site www.eumetsat.de). It follows that this channel should not be recommended as an input to these operational procedures. One approach to overcome this problem is to develop an algorithm for producing top-of-atmosphere (TOA) radiances from Meteosat-8 that simulate TOA radiances of Meteosat-7 by using the two visible narrow bands VIS-1 at 650 nm and the VIS-2 at 800 nm. These simulated radiances may then be used as inputs to the current applications.

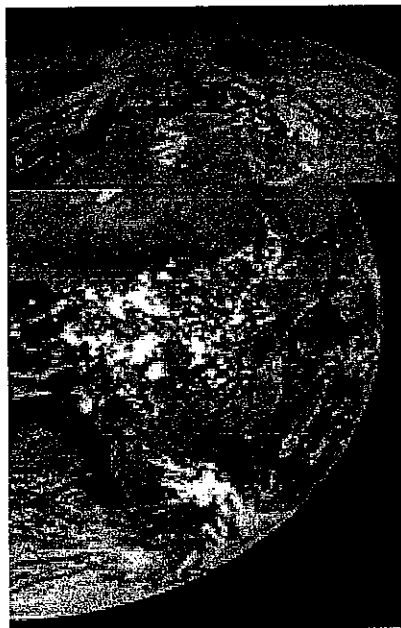


Figure 1. Example of a HRV image, 11 November 2003, 1115 UTC. Spatial resolution is 1 km at satellite nadir. Copyright Eumetsat.

PROBLEM STATEMENT

This problem is relevant to the conversion of narrow-to-broadband TOA radiances that has been the subject of many articles in the past. Let the subscript λ denote the wavelength. Figure 2 exhibits the

normalized spectral responses, S_λ , for the broadband channel of Meteosat-7 and the two visible bands of Meteosat-8, taken from the Eumetsat Web site (see at www.eumetsat.de). The solar spectral irradiance incident at the top of atmosphere, $I_{0\lambda}$, for 1 astronomical unit is also reported. It is that of Neckel and Labs (1984), read from the software 6S (Vermote *et al.* 1997).

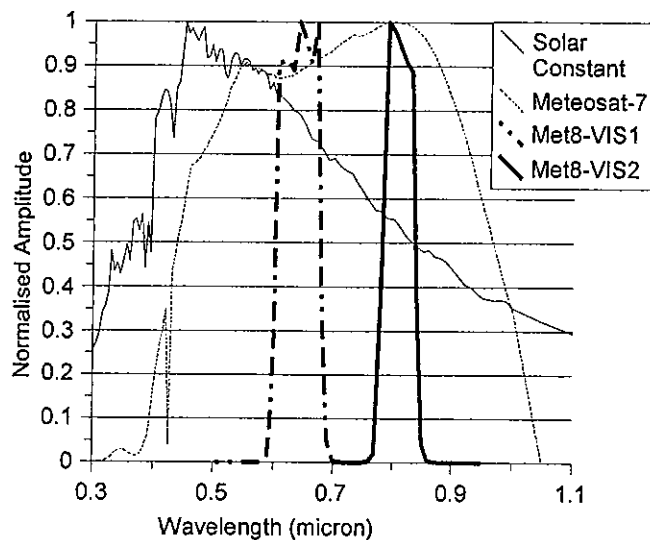


Figure 2. Normalized spectral responses for the broadband of Meteosat-7 and the two visible bands of Meteosat-8. Also reported is the amplitude of the solar spectral irradiance at the TOA (solar constant) normalized by its maximum at 450 nm.

The previous studies show that the narrow-bands and broadband radiances are well correlated and that a linear combination of VIS-1 and VIS-2 would be suitable to assess the broadband radiances (Russell *et al.* 1997; Valiente *et al.* 1995). Russell *et al.* obtained good results with coefficients of the linear combination that are independent of the scene. However, they and Hucek, Jacobowitz (1995) point out that scene-dependent coefficients provide better results. Xiong *et al.* (2002) and Valiente *et al.* estimate that the use of universal (i.e., scene-independent) coefficients leads to a relative error of 5-10% in the retrieved broadband radiances. Li, Trischenko (1999) list the solar zenithal angle as the most significant parameter influencing the coefficients because the relative contribution from the atmospheric scattering increases as this angle increases. Other parameters are cloud properties, precipitable water and ozone amounts and aerosol properties. The coefficients should also depend on the surface type (Hucek, Jacobowitz 1995; Song, Gao 1999). Liang (2001) underlines the need for radiative transfer simulations so that many different atmospheric conditions and surface reflectance spectra can be effectively incorporated in the scene-dependent coefficients for an accurate conversion.

The use of radiative transfer models is time-consuming and universal coefficients are more suitable to

the technical case we want to handle. In particular, real-time is at stake and no more than 1-2 minutes can be allowed to perform this conversion for an image acquired every 15 minutes, a preliminary operation in the whole procedure.

METHOD

Let note CN_{vis1} , L_{vis1} , CN_{vis2} and L_{vis2} , the digital numbers and radiances for the Meteosat-8 channels. Given the calibration coefficients a_i and b_i of the band i (in $\text{mW m}^{-2} \text{st}^{-1} \text{cm}$, see Table 1), the radiances are computed (in $\text{mW m}^{-2} \text{st}^{-1} \text{cm}$):

$$\begin{aligned} L_{vis1} &= a_1 CN_{vis1} + b_1 & \text{with } L_{vis1} \geq 0 \\ L_{vis2} &= a_2 CN_{vis2} + b_2 & \text{with } L_{vis2} \geq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

	VIS-1	VIS-2
Gain ($\text{mW m}^{-2} \text{st}^{-1} \text{cm}$)	0.0227	0.0294
Offset ($\text{mW m}^{-2} \text{st}^{-1} \text{cm}$)	-1.1586	-1.5011
Equivalent integrated solar irradiance ($\text{mW m}^{-2} \text{st}^{-1} \text{cm}$)	66.32488	72.77185

Table 1. Meteosat-8 calibration coefficients for the period under concern. Source: Eumetsat.

The maximum irradiance observed in a band defined by $[\lambda_1, \lambda_2]$ and for 1 astronomical unit is given by

$$I = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{0\lambda} S_{\lambda} d\lambda \quad (2)$$

The maximum irradiance for Meteosat-7, I_{met-7} , is equal to 693.17 W m^{-2} while those for Meteosat-8, respectively noted I_{vis1} and I_{vis2} , are respectively equal to 120.45 and 63.46 W m^{-2} . Denoting L_{broad} the Meteosat-7 simulated radiances, we assume that

$$L_{broad} = \alpha_1 L_{vis1} + \alpha_2 L_{vis2} + \beta \quad (3)$$

where α_1 and α_2 are unitless and are unknown as well as β . The constraints are

$$L_{broad} = 0, \text{ when } L_{vis1} = L_{vis2} = 0, \text{ that implies } \beta = 0$$

$$\text{and } I_{broad} = I_{met-7} = \alpha_1 I_{vis1} + \alpha_2 I_{vis2} \quad (4)$$

We assume that the relative influence of VIS-1 and VIS-2 on L_{broad} is guided by the ratio of I_{vis1} to I_{vis2} :

$$\alpha_1 / \alpha_2 = I_{vis1} / I_{vis2} \quad (5)$$

It comes

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= I_{broad} [I_{vis1} / (I_{vis1}^2 + I_{vis2}^2)] \\ \alpha_2 &= I_{broad} [I_{vis2} / (I_{vis1}^2 + I_{vis2}^2)] \end{aligned} \quad (6)$$

Twelve days of images Meteosat-8, covering the whole field of view, were acquired in October and November 2003. The receiver is a low-cost one, based on the Eumetcast dissemination system. Only eight bits are used to code the signal compared to the original ten bits. CN_{vis1} and CN_{vis2} are computed from the readings of the receiver by multiplying the latter by 4 and adding 2. Then, they were converted into spectral radiances (Eq. 1). Dividing these spectral radiances by the equivalent integrated solar irradiance (Table 1) leads to reflectances (unitless) that are further converted into radiances ($W\ m^{-2}\ st^{-1}$) using the channels filters (Fig. 2). The radiances are combined using the above equations to produce a set of L_{broad} . For the same days and same instants, data acquired by Meteosat-7 were available. The digital counts were converted into radiances by the means of the calibration service available online at Eumetsat.

The two sets of data are compared to check the proposed relation. In order to avoid errors in navigation as well as extreme values that may bias results, the comparison was made on the basis of statistical values for a given area. For each image of Meteosat-7 and -8, and for different areas of very different sizes, we compute the mean value and median. These areas cover different land types (ocean, desert, forests in Europe and Africa...) and are located into different parts of the image in order to have different solar zenithal angles. In addition, observations were taken over very reflective clouds to obtain large radiances. A number of 188 observations were such collected. For each observation, the difference between Meteosat-7 observed radiances and L_{broad} is computed.

Four other series of coincident observed radiances and L_{broad} were constructed in the same way, using the latest four to five days of December 2003, January, February and March 2004. They are used as independent sets to check the validity of the relation with time. It should be noted that the two satellites were not located at the same position in October to December 2003, the difference being approximately 10° . In early January, Meteosat-8 was moved closer to Meteosat-7, the difference being 2.5° .

RESULTS

Figure 3 displays the correlogram between the observed radiances and L_{broad} for the first series. The agreement is correct - the correlation coefficient is 0.99 - but there is a bias equal to 4.7 for a mean value of $65.8\ W\ m^{-2}\ st^{-1}$. The simulated radiances underestimate the observed ones. The root mean square error (RMSE) is $8.2\ W\ m^{-2}\ st^{-1}$.

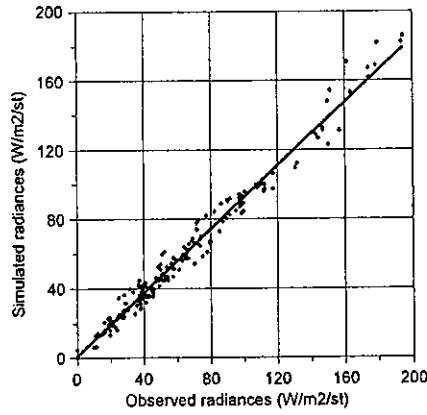


Figure 3. Simulated vs observed radiances. The regression line is reported.

The reasons for this bias are not clear. No trend appears when sorting out the observations by classes of solar zenithal angles. Observations over oceanic areas would have helped in assessing the role of this angle but it was not possible to have enough cloudfree areas. Data were also sorted for land types. No trend was observed; this may be explained by the possibility of the pixels to be contaminated by sub-pixel clouds. We believe that the Rayleigh scattering should contribute to a dispersion of the differences around a mean value and not to a bias. Obviously, several physical processes play a role: their combined effects result in a bias and cannot be separated. The difference in location of both satellites implies that the areas are observed with systematically different viewing angles. This may partly explain the bias. However, the analysis of the four other series for which the satellites are almost at the same position, shows similar results and we may conclude that this influence is small. Another explanation lies in the uncertainties of the calibration coefficients of these sensors. We have scrutinized very thick clouds, exhibiting TOA reflectances greater than 0.70. The reflectances of such objects are deemed to be spectrally constant though there might be a small contribution to short wavelength of the clear sky layer above the cloud. It appears that in 50% of the cases, the reflectances in the VIS-2 channel are larger than those in VIS-1 by a margin greater than 0.05. This may indicate a problem in relative calibration of these bands. In addition, the Meteosat-7 reflectances seem to be slightly overestimated. This finding is supported by the analysis of the few cloudfree oceanic areas exhibiting broadband reflectances less than 0.05, for which the Meteosat-7 reflectances often exceed the VIS-1 ones. These uncertainties in calibration may partly explain the bias.

Given the good fit, a correction linear function is computed for the first series by the means of a regression analysis:

$$\text{Corrected } L_{\text{broad}} = 1.07369 (\alpha_1 L_{\text{vis1}} + \alpha_2 L_{\text{vis2}}) + 1.07965 \quad (7)$$

Figure 4 displays the correlogram between the observed and corrected simulated radiances. Now the bias is null and the RMSE is down to $6.1 \text{ W m}^{-2} \text{ st}^{-1}$, that is 9% of the mean radiance. There is a slight

overestimation for the greatest radiances.

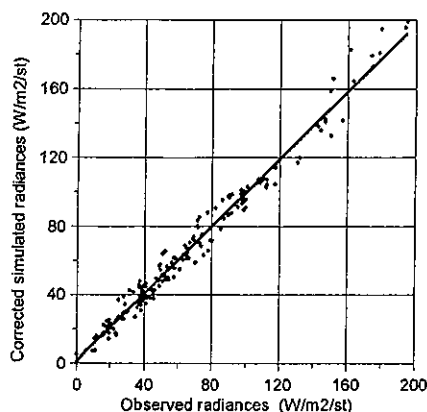


Figure 4. Corrected simulated vs observed radiances. The identity line is reported.

To test the proposed model (Eq. 7), we apply it on the four other series of Meteosat-8 data and perform the comparison with Meteosat-7 data. Table 2 reports the correlation coefficient, bias and RMSE and Figure 5 displays the correlogram. In all cases, the differences display no clear trend with the sun zenithal angle or land type. The correlation coefficient is greater than 0.99. The bias is very small; the relative RMSE ranges between 5 and 7% of the mean radiance. There is no trend with time. This demonstrates that the proposed model may be applied to other series of Meteosat-8 images.

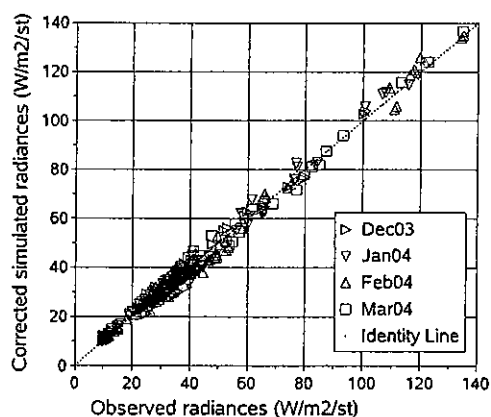


Figure 5. Corrected simulated vs observed radiances. The identity line is reported.

	Dec 03	Jan-04	Feb-04	Mar-04	All
Mean value	32.1	36.8	37.9	45.1	38.0
Correlation coefficient	0.99	1.00	0.99	1.00	1.00

Bias (relative value)	0.2 (0.5%)	0.0 (0.0%)	-0.2 (-0.5%)	0.4 (0.8%)	0.1 (0.2%)
RMSE (relative value)	2.2 (6.8%)	2.2 (6.0%)	2.6 (6.9%)	2.2 (4.9%)	2.3 (6.0%)

Table 2. Comparison between the observed and corrected simulated radiances for the four independent series. In $W m^{-2} sr^{-1}$. The increase in mean radiances is solely due to a difference in area selection.

CONCLUSION

We proposed and tested a means for creating radiances that reproduce those of the Meteosat-7 broadband channel by combining the radiances of the VIS-1 and -2 channels of the Meteosat-8 sensor. This combination is purely arithmetic and thus can be easily and rapidly implemented and operated in an automatic procedure. It is shown that the relative uncertainty is 6% of the mean value with no bias. This is in agreement with the findings of Valiente *et al.* (1995) and Xiong *et al.* (2002). It compares favorably to the uncertainties found in the calibration procedures applied to the series Meteosat-5 to -7: 10-13% (Govaerts 1999; Govaerts *et al.* 2001; Rigollier *et al.* 2002), especially when taking into account the compression factor of 4 applied to the digital counts by the receiving station. Both errors being correlated, an upper limit to the relative total error is 12-14%. It is concluded that the Meteosat-8 images, acquired or not by such receiving stations, may be used in operational procedures that are currently applied to the Meteosat-7 images. These simulated radiances offer the same geographical coverage and approximately the same space resolution -3 km instead of 2.5 km at satellite nadir; the major gain may be an increase in the time sampling: 0.25 h instead of 0.5 h.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank Eumetsat for providing the Meteosat-7 data as well as helping us in setting up the receiving station. We owe to David Taylor, United Kingdom, the tools for exploiting the data acquired by this station. This work took place within the project Heliosat-3 "Energy-specific solar radiation data from Meteosat second generation (MSG)" that is supported by the European Commission, Energy Program NNK5-CT-2000-00322, and by Eumetsat, MSG-RAO Programmed.

REFERENCES

- Anonymous, The Meteosat system, Eumetsat publ. #TD05, 1996.
- Bonifacio, R., G. Dugdale, and J.R. Milford, Sahelian rangeland production in relation to rainfall estimates from Meteosat, *Int. J. Remote Sensing*, 14, 2695-2711, 1993.
- Cros, S., M. Lefèvre, M. Albuissou, and L. Wald, From meteorological satellite data to solar radiation

- climatological products: the HelioClim database, European Geophysical Union Geophysical Research Abstracts, vol. 6, EGU04-A-03853, 2004.
- Diekmann, F. J., S. Happ, M. Rieland, W. Benesch, G. Czeplak, and F. Kasten, An operational estimate of global solar radiation irradiance at ground level from Meteosat data: results from 1985 to 1987, *Meteorologische Rundschau*, 41, 65-79, 1988.
- Govaerts, Y.M., Correction of the Meteosat-5 and -6 radiometer solar channel spectral response with the Meteosat-7 sensor spectral characteristics, *Int. J. Remote Sensing*, 20, 3677-3682, 1999.
- Govaerts, Y.M., A. Arriaga, and J. Schmetz, Operational vicarious calibration of the MSG/SEVIRI solar channels, *Adv. Space Res.*, 28, 21-30, 2001.
- Hucek, R., and H. Jacobowitz, Impact of scene dependence on AVHRR albedo models, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 12, 697-711, 1995.
- La Barbera, P., S. Lo Casto, R. Minciardi, and M. Paolucci, Integrating Meteosat satellite and rain-gauge information to estimate rainfall pattern, *Surveys in Geophysics*, 16, 183-199, 1995.
- Lefèvre, M., C. Rigollier, S. Cros, M. Albuissou, and L. Wald, A shortwave radiation database to support GODAE-related activities, in *Proceedings of the International Symposium "En route to GODAE"*, published by CNES, Toulouse, France, pp. 157-158, 2002.
- Li, Z.Q., and A. Trishenko, A study toward an improved understanding of the relationship between visible and shortwave measurements, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 16, 347-360, 1999.
- Liang, S.L., Narrowband to broadband conversion of land surface albedo I: algorithms, *Remote Sens. Environ.*, 76, 213-238, 2001.
- Neckel, H., and D. Labs, The solar radiation between 3300 and 12500 Å, *Solar Physics*, 90, 205-258, 1984.
- Rigollier, C., M. Lefèvre, Ph. Blanc, and L. Wald, The operational calibration of images taken in the visible channel of the Meteosat-series of satellites, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 19, 1285-1293, 2002.
- Rimoczi-Paal, A., J. Kerényi, J. Mika, R. Randriamampianina, I. Dobi, Z. Imecs, and T. Szentimrey, Mapping daily and monthly radiation components using Meteosat data, *Adv. Space Res.*, 24, 967-970, 1999.
- Rosema, A., Using Meteosat for operational evapotranspiration and biomass monitoring in the Sahel region, *Remote Sens. Environ.*, 46, 27-44, 1993.
- Russell, M.J., M. Nunez, M.A. Chladil, J.A. Valiente, and E. Lopez-Baeza, Conversion of nadir, narrowband reflectance in red and near-infrared channels to hemispherical surface albedo, *Remote Sens. Environ.*, 61, 16-23, 1997.
- Schmetz, J., P. Pili, S. Tjemkes, D. Just, J. Kerkmann, S. Rota, and A. Ratier, An introduction to Meteosat Second Generation (MSG), *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 83, 977-984, 2002.
- Snijders, F. L., Rainfall monitoring based on Meteosat data - a comparison of techniques applied to the Western Sahel, *Int. J. Remote Sensing*, 12, 1331-1347, 1991.

Song, J., and W. Gao, An improved method to derive surface albedo from narrowband AVHRR satellite data: narrowband to broadband conversion, *J. Appl. Meteorol.*, 38, 239-249, 1999.

Valiente, J.A., M. Nunez, M. Lopez-Baeza, and J.F. Moreno, Narrow-band to broad-band conversion for Meteosat-visible channel and broad-band albedo using both AVHRR-1 and AVHRR-2 channels, *Int. J. Remote Sensing*, 16, 1147-1166, 1995.

Vermote, E.F., D. Tanré, J.L. Deuzé, M. Herman, and J.J. Morcrette, Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 35, 675-686, 1997.

Xiong, X.Z., K. Stamnes, and D. Lubin, Surface albedo over the Arctic Ocean derived from AVHRR and its validation with SHEBA data, *J. Appl. Meteorol.*, 41, 413-425, 2002.

CREATION D'UNE CLIMATOLOGIE DU RAYONNEMENT SOLAIRE INCIDENT EN ONDES COURTES A L'AIDE D'IMAGES SATELLITALES

Résumé

Les caractéristiques du rayonnement solaire incident en ondes courtes sont une connaissance essentielle pour un nombre croissant de domaines. Il existe des méthodes permettant d'estimer l'irradiation globale au sol à partir des images du spectre visible des satellites météorologiques géostationnaires, de manière plus efficace que l'interpolation spatiale de mesures en stations météorologiques. Cependant, malgré la disponibilité des images satellitaires depuis plus de 25 ans, il n'existe pas actuellement de séries temporelles de l'irradiation globale à échelle mondiale avec une haute résolution spatiale sur une longue période. De plus, les méthodes satellitaires ne permettent pas d'estimer avec précision les composantes directe et diffuse ainsi que la distribution spectrale du rayonnement solaire. Il existe donc une part non satisfaite des besoins des utilisateurs de données solaires au sol.

Dans ce contexte, nous proposons un traitement opérationnel d'une série temporelle d'images Meteosat avec la méthode d'estimation du rayonnement solaire au sol Heliosat II. Nous diffusons les résultats de ce traitement en contribuant au développement d'un système d'information, appelée HelioClim-1, permettant d'obtenir, au travers d'Internet, l'irradiation globale pour l'Europe, l'Afrique et l'océan Atlantique de 1985 à 2004. Nous avons évalué la qualité des données contenues dans HelioClim-1 et analysé les erreurs par comparaisons avec des mesures acquises en stations météorologiques. Nous avons créé une continuité temporelle de ce système en participant à l'élaboration d'une méthode d'estimation du rayonnement solaire au sol (Heliosat III) bénéficiant des capacités améliorées de *Meteosat Second Generation* et en préparant les spécifications d'un nouveau système d'information contenant les résultats de cette nouvelle méthode.

Ces travaux ont apporté une amélioration à la qualité et l'accessibilité de l'information du rayonnement solaire au sol en utilisant les outils d'estimation satellitaire existants et les nouvelles technologies de l'information et de la communication. Ils ouvrent la voie à un accès à une information de qualité sur le rayonnement solaire pour l'ensemble de la surface terrestre.

Mots clés : rayonnement solaire, climatologie, Meteosat, HelioClim, télédétection, système d'information

DESIGN OF AN INCIDENT SHORTWAVE SOLAR RADIATION CLIMATOLOGY USING SATELLITE IMAGES

Abstract

The properties of incident shortwave solar radiation are an essential knowledge in several fields. Global irradiation at ground level can be estimated by processing images taken by geostationary meteorological satellites in visible channel. Results are more accurate than those provided by a spatial interpolation of ground stations measurements. However, in spite of the satellite data availability for more than 25 years, long term time series of global irradiation offering a worldwide coverage and a high spatial resolution do not currently exist. Moreover, satellite-based assessment methods cannot accurately estimate direct and diffuse components, and spectral distribution of solar radiation. There is thus a non-satisfied part of solar data user requirements.

In this context, we propose an operational processing of time series of Meteosat images using the solar radiation assessment method called Heliosat II. We disseminate the results by developing an information system called HelioClim-1. This system delivers on-line global irradiation data over Europe, Africa and Atlantic Ocean from 1985 to 2004. We assess the quality of these data and analyse their uncertainties by comparing them with ground measurements. We ensure a temporal continuity of this system by participating on the design of a new method (Heliosat III) benefiting of the Meteosat Second Generation enhanced capabilities and by preparing the specifications of a new information system containing Heliosat III results.

This work improves the quality and the accessibility of solar radiation information at ground level by using current satellite tools and new technologies of information and communication. It opens the way to a worldwide coverage of solar radiation information with a good quality and a convenient access.

Key words : solar radiation, climatology, Meteosat, HelioClim, remote sensing, information system

Laboratoire d'accueil : Centre d'Energétique - Ecole des Mines de Paris
Rue Claude Daunesse - B.P. 207 - F - 06904 Sophia Antipolis Cedex
Thèse présentée par : CROS Sylvain le : 13 septembre 2004
Discipline : "Energétique" - Ecole des Mines de Paris
